



PCT

特許協力条約に基づいて公開された国際出願

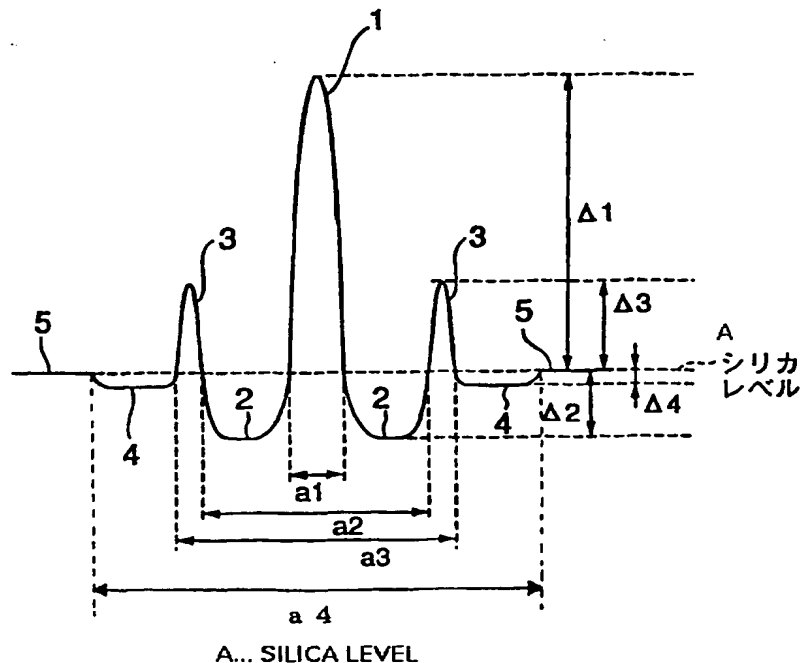
<p>(51) 国際特許分類7 G02B 6/22, 6/16</p>	<p>A1</p>	<p>(11) 国際公開番号 WO00/70378</p> <p>(43) 国際公開日 2000年11月23日(23.11.00)</p>
<p>(21) 国際出願番号 PCT/JP00/03148</p> <p>(22) 国際出願日 2000年5月17日(17.05.00)</p> <p>(30) 優先権データ 特願平11/135799 1999年5月17日(17.05.99) JP 特願2000/118217 2000年4月19日(19.04.00) JP</p> <p>(71) 出願人 (米国を除くすべての指定国について) 古河電気工業株式会社 (THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.)[JP/JP] 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 Tokyo, (JP)</p> <p>(72) 発明者; および (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ) 荒井慎一(ARAI, Shinichi)[JP/JP] 杉崎隆一(SUGIZAKI, Ryuichi)[JP/JP] 相曾景一(AISO, Keiichi)[JP/JP] 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo, (JP)</p> <p>(74) 代理人 五十嵐清(IGARASHI, Kiyoshi) 〒220-0011 神奈川県横浜市西区高島2丁目10番13号 横浜東口ビル908号室 Kanagawa, (JP)</p>		<p>(81) 指定国 JP, US, 欧州特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE)</p> <p>添付公開書類 国際調査報告書</p>

(54)Title: OPTICAL FIBER AND OPTICAL TRANSMISSION LINE COMPRISING THE OPTICAL FIBER

(54)発明の名称 光ファイバおよびその光ファイバを用いた光伝送路

(57) Abstract

An optical fiber having a negative dispersion and a negative dispersion slope in the wavelength band used, having little distortion due to the nonlinear phenomenon so as to be adaptive to wavelength multiplex optical transmission, and capable of operating in a single mode. The relationships between the relative refractive-index differences  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$ ,  $\Delta 3$ , and  $\Delta 4$ , of a center core (1), a first side core (2), a second side core (3), and inner clad part (4) to the silica level respectively are:  $1.7 \leq \Delta 1$ ,  $\Delta 2 \leq -0.3\%$ ,  $0.25\% \leq \Delta 3$ ,  $\Delta 4 < 0$ . The quotient A of the diameter  $a_1$  of the center core (1) divided by the diameter  $a_2$  of the first side core (2) is  $0.15 \leq A \leq 0.5$ , and the quotient B of the diameter  $a_3$  of the second side core (3) divided by the diameter  $a_2$  of the first side core (3) is  $1 < B \leq 2$ . As a result, the absolute values of the negative dispersion and the negative dispersion slope in the wavelength 1.55  $\mu\text{m}$  band are large, light is confined in a core part by means of the second side core (3), the effective core area is large, and the effective cut-off frequency is short because of the provision of the inner clad part (4).



## (57)要約

本発明は、使用波長帯において負の分散と負の分散スロープとを有し、波長多重光伝送に適するように、非線形現象による歪みを抑制できるシングルモード動作可能な光ファイバを提供する。センタコア（１）と、第１サイドコア（２）と、第２サイドコア（３）と、内部クラッド部（４）のシリカレベルに対する比屈折率差をそれぞれ $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、 $\Delta 3$ 、 $\Delta 4$ としたとき、 $1.7\% \leq \Delta 1$ 、 $\Delta 2 \leq -0.3\%$ 、 $0.25\% \leq \Delta 3$ 、 $\Delta 4 < 0$ とする。また、センタコア１の直径 $a_1$ を第１サイドコア２の直径 $a_2$ で割った値 $A$ が $0.15 \leq A \leq 0.5$ 、第２サイドコア２の直径 $a_3$ を第１サイドコア３の直径 $a_2$ で割った値 $B$ が $1 < B \leq 2$ となるようにする。この構成により、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯における負の分散と負の分散スロープの絶対値を共に大きくすると共に、第２サイドコア（３）により光をコア部に閉じ込め、有効コア断面積を大きくし、内部クラッド部（４）を設けて有効遮断波長を短波長化する。

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第一頁に掲載されたPCT加盟国を同定するために使用されるコード(参考情報)

AE	アラブ首長国連邦	DM	ドミニカ	KZ	カザフスタン	RU	ロシア
AG	アンティグア・バーブーダ	DZ	アルジェリア	LC	セントルシア	SD	スーダン
AL	アルバニア	EE	エストニア	LI	リヒテンシュタイン	SE	スウェーデン
AM	アルメニア	ES	スペイン	LK	スリ・ランカ	SG	シンガポール
AT	オーストリア	FI	フィンランド	LR	リベリア	SI	スロヴェニア
AU	オーストラリア	FR	フランス	LS	レソト	SK	スロヴァキア
AZ	アゼルバイジャン	GA	ガボン	LT	リトアニア	SL	シエラ・レオネ
BA	ボスニア・ヘルツェゴビナ	GB	英国	LU	ルクセンブルグ	SN	セネガル
BB	バルバドス	GD	グレナダ	LV	ラトヴィア	SZ	スワジランド
BE	ベルギー	GE	グルジア	MA	モロッコ	TD	チャド
BF	ブルキナ・ファソ	GH	ガーナ	MC	モナコ	TG	トーゴ
BG	ブルガリア	GM	ガンビア	MD	モルドヴァ	TJ	タジキスタン
BJ	ベナン	GN	ギニア	MG	マダガスカル	TM	トルクメニスタン
BR	ブラジル	GR	ギリシャ	MK	マケドニア旧ユーゴスラヴィア	TR	トルコ
BY	ベラルーシ	GW	ギニア・ビサウ		共和国	TT	トリニダード・トバゴ
CA	カナダ	HR	クロアチア	ML	マリ	TZ	タンザニア
CF	中央アフリカ	HU	ハンガリー	MN	モンゴル	UA	ウクライナ
CG	コンゴ	ID	インドネシア	MR	モーリタニア	UG	ウガンダ
CH	スイス	IE	アイルランド	MW	マラウイ	US	米国
CI	コートジボワール	IL	イスラエル	MX	メキシコ	UZ	ウズベキスタン
CM	カメルーン	IN	インド	MZ	モザンビーク	VN	ヴェトナム
CN	中国	IS	アイスランド	NE	ニジェール	YU	ユーゴスラヴィア
CR	コスタ・リカ	IT	イタリア	NL	オランダ	ZA	南アフリカ共和国
CU	キューバ	JP	日本	NO	ノルウェー	ZW	ジンバブエ
CY	キプロス	KE	ケニア	NZ	ニュージーランド		
CZ	チェコ	KG	キルギスタン	PL	ポーランド		
DE	ドイツ	KP	北朝鮮	PT	ポルトガル		
DK	デンマーク	KR	韓国	RO	ルーマニア		

## 明 細 書

光ファイバおよびその光ファイバを用いた光伝送路

## 技術分野

本発明は、例えば波長  $1.55\ \mu\text{m}$  帯等の波長帯における波長多重光伝送に適した光ファイバおよびその光ファイバを用いた波長多重光伝送路に関するものである。

## 背景技術

光通信の伝送網として、波長  $1.3\ \mu\text{m}$  の波長帯に零分散を持つシングルモード光ファイバが世界中に敷設されている。最近においては、情報社会の発展により、通信情報量が飛躍的に増大する傾向にある。このような情報の増大化に伴い、波長多重伝送（WDM伝送）が通信分野に広く受け入れられ、今や波長多重伝送の時代を迎えている。波長多重伝送は、光通信の波長が一波長でなく、複数の波長に分割して複数の光信号を伝送する方式であり、大容量高速通信に適した光伝送方式である。

しかしながら、既設の  $1.3\ \mu\text{m}$  付近に零分散を持つ伝送用シングルモード光ファイバを使用し、 $1.3\ \mu\text{m}$  付近の波長帯を用いて波長多重光通信を行う場合には、エルビウムドープ光ファイバを用いた一般的な光増幅器の利得帯域（ $1500\ \text{nm} \sim 1650\ \text{nm}$  が含まれる）である波長  $1.55\ \mu\text{m}$  帯（例えば  $1530\ \text{nm} \sim 1570\ \text{nm}$ ）と波長域が一致しない。そのため、 $1.3\ \mu\text{m}$  付近の波長帯を用いて光通信を行う場合は、光増幅器が使用できず、長距離光通信に支障を来すという問題がある。この問題を解決するため、最近においては、光増幅器を使

用し、既設の  $1.3 \mu\text{m}$  付近の波長帯に零分散を持つシングルモード光ファイバを用いて、 $1.55 \mu\text{m}$  の波長帯での波長多重光通信が行われている。

しかしながら、 $1.3 \mu\text{m}$  付近に零分散を持つシングルモード光ファイバを用いて  $1.55 \mu\text{m}$  の波長帯で光通信を行うと、既設のシングルモード光ファイバは、 $1.55 \mu\text{m}$  の波長帯の中心波長である波長  $1.55 \mu\text{m}$  において、通常、約  $17 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$  の正の分散を有し、さらに、シングルモード光ファイバは、波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯において約  $0.06 \text{ ps} / \text{nm}^2 / \text{km}$  の正の分散スロープを持つ。そのため、シングルモード光ファイバ中を光信号が伝搬するにつれ、波長多重の各波長の信号の波形歪みが大きくなり、受信側で信号の分離・識別が困難になり、光通信の品質が低下し、光通信の信頼性が失われるという問題が生じた。

また、光通信の伝送網としては、零分散波長を光増幅器の利得帯域である  $1.55 \mu\text{m}$  付近にシフトさせた分散シフト光ファイバが提案されている。ところで、光通信の波長における分散が零に近くなると、四光波混合という非線形現象が発生し易くなるので、特に波長多重伝送においては、光通信の波長において非線形現象が発生しない程度の微小分散を有する分散シフト光ファイバを使用することが望まれている。

しかしながら、前述の微小分散を有する分散シフト光ファイバを長距離の光通信に用いると、微小分散の影響が無視できなくなるため、微小分散を有する分散シフト光ファイバを単独で長距離の大容量高速通信に用いることは困難である。

そこで、このような問題を解消すべく、 $1.3 \mu\text{m}$  零分散シングルモード光ファイバの波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯における分散を補償するために、波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯において大きな負の分散を有する光ファイバが前記

シングルモード光ファイバ伝送路に挿入され、それにより、前記シングルモード光ファイバが波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯に持つ正の分散を補償して波長分散による伝送信号の劣化を抑制する方法が提案されている。

上記分散を補償する光ファイバの例として、例えば、第6図に示すような単峰型の屈折率プロファイルを有する光ファイバが提案されている。単峰型の屈折率プロファイルを有する光ファイバは、シリカレベルよりも屈折率が高いセンタコア1の周りを外部クラッド5で覆って形成されるものである。提案例の光ファイバは、外部クラッド5の屈折率がシリカガラスの屈折率レベルよりも小さく形成されている。

しかしながら、単峰型の屈折率プロファイルを有する光ファイバの波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯における分散値は、せいぜい  $-80 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$  程度が実用上の限界値であり、それ以上小さい分散値の（負の分散の絶対値が大きい）光ファイバを単峰型の屈折率プロファイルによって実現することはできなかった。そのため、前記シングルモード光ファイバの正の分散を単峰型の屈折率プロファイルの光ファイバによって補償するためには、必要とする分散補償用光ファイバの長さが長くなり、その光ファイバをコイル化してケース内に収めて形成される分散補償用光ファイバモジュールの小型化が困難であった。

また、単峰型の屈折率プロファイルの光ファイバは、波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯の分散スロープが正であり、したがって、前記シングルモード光ファイバの波長分散を波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯の広帯域において補償することが困難であった。

そこで、第7図に示すようなW型の屈折率プロファイルを有する光ファイバが提案された。W型の屈折率プロファイルを有する光ファイバは、クラッドレベルよりも屈折率が高いセンタコア1の周りをクラッドレベルよりも屈折率が小さいサイドコア12で覆い、通常はサイドコア

12の周りをほぼシリカレベルの屈折率を有する外部クラッド5で覆って形成されている。

W型の屈折率プロファイルを有する光ファイバは、単峰型の屈折率プロファイルを有する光ファイバに比べ、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯の分散値を小さく（負の分散の絶対値を大きく）することができ、波長 $1.55\mu\text{m}$ における分散値が $-120\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 程度の光ファイバが実用化されている。また、W型の屈折率プロファイルを有する光ファイバは、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯における分散スロープを負とすることができるため、前記シングルモード光ファイバの正の分散スロープを実用可能な程度に補償することができ、単峰型の屈折率プロファイルの光ファイバに比べ、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯の広帯域における分散を補償することができる。

なお、例えば日本国特許出願の公開公報の特開平8-313750号には、W型の屈折率プロファイルの詳細な構造を適切に決定した光ファイバを用いて、前記シングルモード光ファイバの波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯における波長分散および分散スロープを補償することにより、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯の波長分散および分散スロープをほぼ零に補償することが提案されている。また、1996年電子情報通信学会エレクトロソサエティ大会C-172においては、W型の屈折率プロファイルの光ファイバを用いて、前記シングルモード光ファイバの分散を補償することにより、波長 $1500\sim 1600\text{nm}$ の波長帯における波長分散を $-1\sim 0\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ に抑えたことが報告されている。

しかしながら、W型の屈折率プロファイルの光ファイバにおいては、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯の中心波長である波長 $1.55\mu\text{m}$ において補償対象の光ファイバが有する正の分散スロープを完全補償できるような負の分散スロープを有し、かつ、 $-120\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ よりも小さい分

散を有する光ファイバを形成することは困難であった。

そのため、W型の光ファイバを用いた場合にも、前記シングルモード光ファイバの分散補償に必要とする光ファイバの長さが長くなり、その光ファイバをコイル化してケース内に収めて形成される光ファイバモジュールの小型化が困難であった。

また、従来の光ファイバは、単峰型とW型のいずれにおいても、シングルモードで光の伝搬していく領域（実効コア断面積）が小さく、光ファイバ内を伝搬する光のパワー密度が高くなり、加えて、前記の如く、使用する光ファイバの長さが長くなるので、光ファイバ内で非線形現象が発生しやすかった。そうすると、この非線形現象による信号波形の歪みの問題が生じ、正確な通信ができなくなるため、光ファイバを用いた分散補償器の利用を制限せざるを得なかった。

また、微小分散を有する分散シフト光ファイバの分散を補償するための光ファイバを用いて波長分散による伝送信号の劣化を防ぐことも考えられるが、単峰型やW型の屈折率プロファイルの光ファイバでは、微小分散を有する分散シフト光ファイバの分散および分散スロープを完全に補償することは困難であると考えられる。

本発明は、上記課題を解決するためになされたものであり、その第1の目的は、例えば波長  $1.55\mu\text{m}$  帯といった使用波長帯における単位長さあたりの負の分散の絶対値と負の分散スロープの絶対値が共に大きいことにより、短い長さで使用波長帯より短波長側に零分散波長を有するシングルモード光ファイバの正の分散を前記使用波長帯の広帯域において補償することができる光ファイバや、実効コア断面積が大きくて非線形現象による信号波形の歪みを低減できる光ファイバを提供することにある。第2の目的は、このような光ファイバを用いることにより、使用波長帯の広帯域において分散による信号波形の歪みや非線形現象によ

る信号波形の歪みが小さく、波長多重伝送用として適した光伝送路を提供することにある。

#### 発明の開示

上記目的を達成するために、本発明は次のような構成をもって課題を解決する。すなわち、本発明の光ファイバの第1の構成は、センタコアの外周側を第1サイドコアで覆い、該第1サイドコアの外周側を第2サイドコアで覆い、該第2サイドコアの外周側を外部クラッドで覆って形成される光ファイバであって、前記センタコアの屈折率の最大値を $n_1$ とし、前記第1サイドコアの屈折率の最小値を $n_2$ とし、前記第2サイドコアの屈折率の最大値を $n_3$ とし、前記外部クラッドの屈折率を $n_c$ としたとき、 $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ と成しており、前記外部クラッドに対する前記センタコアの比屈折率差を $\Delta_1$ とし、前記外部クラッドに対する前記第1サイドコアの比屈折率差を $\Delta_2$ とし、前記外部クラッドに対する前記第2サイドコアの比屈折率差を $\Delta_3$ としたときに、 $1.7\% \leq \Delta_1$ 、 $\Delta_2 \leq -0.3\%$ 、 $0.25\% \leq \Delta_3$ と成し、前記センタコアの直径 $a_1$ を前記第1サイドコアの直径 $a_2$ で割った値 $A$ が $0.15 \leq A \leq 0.5$ 、前記第2サイドコアの直径 $a_3$ を前記第1サイドコアの直径 $a_2$ で割った値 $B$ が $1 < B \leq 2$ と成していることを特徴とする。

好ましくは、第2サイドコアは1つ以上の屈折率極大部を有し、この1つ以上の屈折率極大部のうち屈折率最大部の位置が第2サイドコアの径方向の幅中心部よりも第1サイドコア側寄りとする。

さらに好ましくは、第2サイドコアの外周側を内部クラッド部で覆い、該内部クラッド部の外周側を外部クラッドで覆う構成とし、前記内部クラッド部の屈折率を前記外部クラッドの屈折率よりも小さくする。

また、使用波長帯における波長分散を $-120 \text{ ps/nm/km}$ 未満



とする。

さらに、使用波長帯における波長分散 $D$ を波長分散スロープ $S$ で割った $D/S$ 値を $0 \sim 500 \text{ nm}$ とし、より好ましくは、 $D/S$ 値を $0 \sim 300 \text{ nm}$ とする。

そして、本発明の光ファイバの使用波長帯は波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯とすることが特に好ましい。

また、本発明の光伝送路の第1の構成は、使用波長帯よりも短波長側の波長帯に零分散をもつシングルモード光ファイバに上記構成の本発明の光ファイバを接続することにより使用波長帯における分散スロープをほぼ零としたことを特徴とする。

さらに、本発明の光伝送路の第2の構成は、使用波長帯よりも短波長側の波長帯に零分散をもつシングルモード光ファイバに、上記構成の本発明の光ファイバと、使用波長帯における波長分散 $D$ を波長分散スロープ $S$ で割った $D/S$ 値が $300 \text{ nm}$ より大きい光ファイバ又は前記 $D/S$ 値が負の光ファイバとを接続することにより使用波長帯における分散スロープと分散値を共にほぼ零としたことを特徴とする。

本発明者は、光ファイバの屈折率プロファイルをW型の屈折率プロファイルにすると、波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯における単位長さあたりの負の分散の絶対値を比較的大きくできることに着目し、W型の屈折率プロファイルにおける詳細な構造を変えたときの波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯における単位長さあたりの負の分散の絶対値の変化を検討した。その結果、センタコアとサイドコアとを含むコア径を小径化すると、前記絶対値が大きくなることを確認できた。しかしながら、この場合、屈折率の高いセンタコアへの光の閉込め効果が弱まり、光の伝搬条件を満たさず、通光しない、あるいは、通光するものの、曲げ損失が非常に大きくなってしまい、光ファイバをコイル化して分散補償モジュールとすることができない

ことが判明した。

そこで、W型の屈折率プロファイルにおけるサイドコアの外周にサイドコアよりも屈折率が高いセグメントコアを設け、W型の屈折率プロファイルのセンタコアから漏れて伝搬しない状態の光を屈折率の高いセグメントコアが閉じ込める（クラッド側に逃がさない）ことにより、光を伝搬させると共に、前記曲げ損失を低減することにした。また、このことにより、光がセンタコアの中心部以外の部分にも広く分布しながら伝搬していくことになり、実質的に実効コア断面積を大きくして、伝搬する光のパワー密度を減ずることが可能となることが分かった。

上記検討に基づき、本発明の光ファイバにおいては、W型屈折率プロファイルにおけるサイドコア12を第1サイドコアと称し、前記セグメントコアを第2サイドコアと称することにし、センタコアの屈折率の最大値 $n_1$ と第1サイドコアの屈折率の最小値 $n_2$ と第2サイドコアの屈折率の最大値 $n_3$ と外部クラッドの屈折率 $n_c$ との関係を、 $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ とした。また、センタコアの直径 $a_1$ を前記第1サイドコアの直径 $a_2$ で割った値 $A$ が $0.15 \leq A \leq 0.5$ 、第2サイドコアの直径 $a_3$ を第1サイドコアの直径 $a_2$ で割った値 $B$ が $1 < B \leq 2$ となるようにし、実効コア断面積の拡大を可能とした。

そして、さらに、外部クラッドに対するセンタコアの比屈折率差 $\Delta_1$ と、外部クラッドに対する第1サイドコアの比屈折率差 $\Delta_2$ と、外部クラッドに対する第2サイドコアの比屈折率差 $\Delta_3$ の各値を $1.7\% \leq \Delta_1$ 、 $\Delta_2 \leq -0.3\%$ 、 $0.25\% \leq \Delta_3$ と具体的に決定することにより、光ファイバ単位長さ当たりの分散値を例えば $-120 \text{ ps/nm/km}$ 未満といった小さな値（負の分散の絶対値を大きな値）とし、負の分散スロープの絶対値を大きくすることを可能とした。

本発明者による前記検討に基づいて屈折率プロファイルを最適化する

ことにより、本発明の光ファイバは、使用波長帯における単位長さあたりの負の分散の絶対値と負の分散スロープの絶対値が共に大きい光ファイバとしたものであるから、短い長さで、例えば  $1.3 \mu\text{m}$  帯零分散シングルモード光ファイバの正の分散を波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯といった使用波長帯の広帯域において補償することができる光ファイバや、実効コア断面積を拡大して非線形現象による歪みを低減できる光ファイバとすることができる。

また、第2サイドコアに1つ以上の屈折率極大部を持たせた構成の光ファイバによれば、第2サイドコアの屈折率分布が平坦な屈折率極大部を持たない光ファイバに比べ、負の分散の絶対値と負の分散勾配の絶対値を共に大きくすることができる。

さらに、第2サイドコアが有する1つ以上の屈折率極大部のうち屈折率最大部の位置が第2サイドコアの径方向中心部よりも第1サイドコア側と成している構成の光ファイバによれば、実効遮断波長を短波長側にしつつ、負の分散の絶対値と負の分散勾配の絶対値を共に大きい光ファイバの実現をより一層確実に図ることができる。

さらに、第2サイドコアの外周側を内部クラッド部で覆い、該内部クラッド部の外周側を外部クラッドで覆う構成とし、前記内部クラッド部の屈折率を前記外部クラッドの屈折率よりも小さくした構成の光ファイバによれば、内部クラッド部を設けることにより、コア径方向の広い範囲に電界分布を有する  $LP_{11}$  モードの光を漏れやすくして実効遮断波長を短波長化し、確実にシングルモード動作可能な光ファイバとしつつ、負の分散の絶対値と負の分散勾配の絶対値を共に大きい光ファイバの実現をより一層確実に図ることができる。

さらに、使用波長帯における波長分散を  $-120 \text{ ps/nm/km}$  未満とした構成の光ファイバによれば、このように、使用波長帯における

負の波長分散の絶対値を大きくすることにより、短い長さの光ファイバで1.3  $\mu$ m帯零分散シングルモード光ファイバなどの正の分散を補償することができる。

さらに、使用波長帯における波長分散Dを波長分散スロープSで割ったD/S値を0～500nmとした光ファイバによれば、短い長さの光ファイバで1.3  $\mu$ m帯零分散シングルモード光ファイバなどの光ファイバにおける正の分散を補償することができる。特に、D/S値を0～300nmとした光ファイバによれば、より一層短い長さの光ファイバで1.3  $\mu$ m帯零分散シングルモード光ファイバなどの正の分散と正の分散スロープを補償することができる。

さらに、使用波長帯を波長1.55  $\mu$ m帯とした光ファイバによれば、エルビウムドープ光ファイバを備えた光増幅器を用いた波長多重光伝送用として、この光ファイバを適用することにより、短い長さの光ファイバで1.3  $\mu$ m帯零分散シングルモード光ファイバなどの正の分散や正の分散スロープを補償することができる。

さらに、本発明の光伝送路によれば、上記のような光ファイバを用いることにより、使用波長帯の広帯域において分散や分散スロープをほぼ零にすることができるために、分散による歪みが小さい波長多重伝送用として適した光伝送路とすることができ、特に、使用波長帯における分散スロープと分散値を共にほぼ零とした構成の光伝送路によれば、前記分散と分散スロープを共にほぼゼロとすることにより、分散による歪みが殆どない波長多重伝送用として非常に適した光伝送路とすることができる。

#### 図面の簡単な説明

第1図は、本発明に係る光ファイバの第1実施形態例の屈折率プロフ

ァイルを示す構成図であり、第2図は、本発明に係る光ファイバの第2実施形態例の屈折率プロファイルを示す構成図であり、第3図は、上記第1実施形態例の光ファイバを1.3  $\mu\text{m}$  帯零分散シングルモード光ファイバに接続して形成される光伝送路の特性例を示すグラフであり、第4図は、上記第1実施形態例の異なる特性を有する2種類の光ファイバを1.3  $\mu\text{m}$  帯零分散シングルモード光ファイバに接続して形成される光伝送路の特性例を示すグラフであり、第5図は、上記第1実施形態例の光ファイバの具体例(a)と比較例(b)について、光ファイバ中心からクラッドの途中部までの屈折率プロファイルをそれぞれ示す説明図であり、第6図は、単峰型の光ファイバの屈折率プロファイルを示す説明図であり、第7図は、W型の光ファイバの屈折率プロファイルを示す説明図である。

#### 発明を実施するための最良の形態

本発明をより詳細に説述するために、実施形態例の添付の図面に従ってこれを説明する。なお、以下の各実施形態例の説明において、従来例と同一名称部分には同一符号を付し、その重複説明は省略又は簡略化する。

第1図には、本発明に係る光ファイバの第1実施形態例の屈折率プロファイルが示されている。同図に示されるように、本実施形態例の光ファイバは、センタコア1の外周側を第1サイドコア2で覆い、第1サイドコア2の外周側を第2サイドコア3で覆い、第2サイドコア3の外周側を外部クラッド5で覆って形成されている。外部クラッド5はシリカにより形成されており、センタコア1と第2サイドコア3の各屈折率はシリカの屈折率よりも高く形成され、第1サイドコア2の屈折率はシリカの屈折率よりも低く形成されている。そして、センタコア1の屈折率

(センタコア 1 の屈折率の最大値)  $n_1$  と第 1 サイドコア 2 の屈折率 (第 1 サイドコア 2 の屈折率の最小値)  $n_2$  と第 2 サイドコアの屈折率 (第 2 サイドコアの屈折率の最大値)  $n_3$  と外部クラッド 5 の屈折率  $n_c$  との関係が、 $n_1 > n_3 > n_c > n_2$  と成している。なお、これらの屈折率の値は、真空の屈折率を 1 としたときの値である。

また、クラッドレベルに対するセンタコア 1 の比屈折率差 (すなわち、外部クラッド 5 に対するセンタコア 1 の比屈折率差) を  $\Delta 1$  とし、クラッドレベルに対する第 1 サイドコア 2 の比屈折率差 (すなわち、外部クラッド 5 に対する第 1 サイドコア 2 の比屈折率差) を  $\Delta 2$  とし、クラッドレベルに対する第 2 サイドコア 3 の比屈折率差 (外部クラッド 5 に対する第 2 サイドコア 3 の比屈折率差) を  $\Delta 3$  としたときに、 $1.7\% \leq \Delta 1$ 、 $\Delta 2 \leq -0.3\%$ 、 $0.25\% \leq \Delta 3$  に形成されている。

なお、各比屈折率差  $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、 $\Delta 3$  は、次式 (1) ~ (3) により定義されるものであり、その単位は、% である。

$$\Delta 1 = [ \{ (n_1)^2 - (n_c)^2 \} / 2 (n_c)^2 ] \times 100 \dots \quad (1)$$

$$\Delta 2 = [ \{ (n_2)^2 - (n_c)^2 \} / 2 (n_c)^2 ] \times 100 \dots \quad (2)$$

$$\Delta 3 = [ \{ (n_3)^2 - (n_c)^2 \} / 2 (n_c)^2 ] \times 100 \dots \quad (3)$$

さらに、本実施形態例では、前記センタコアの直径  $a_1$  を前記第 1 サイドコアの直径  $a_2$  で割った値  $A$  ( $A = a_1 / a_2$ ) が、 $0.15 \leq A \leq 0.5$ 、第 2 サイドコアの直径  $a_3$  を第 1 サイドコアの直径  $a_2$  で割った値  $B$  ( $B = a_3 / a_2$ ) が、 $1 < B \leq 2$  と成している。

以上のような屈折率プロファイルを実現するために、本実施形態例では、センタコア 1 と第 2 サイドコア 3 はゲルマニウムドーブシリカによ

り形成し、第1サイドコア2はフッ素ドーピングシリカにより形成した。なお、センタコア1、第1サイドコア2にゲルマニウムとフッ素とがドーピングされたものや、センタコア1、第1サイドコア2、第2サイドコア3にゲルマニウムとフッ素とがドーピングされたものとしてもよい。

なお、本発明者は、本実施形態例の光ファイバの屈折率プロファイルを上記のように決定するにあたり、まず、W型の屈折率プロファイルの光ファイバのセンタコアとサイドコアとを含むコア径を小径化すると、例えば波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯の中心波長である波長 $1.55\mu\text{m}$ における負の分散の絶対値が大きくなることを確認した。そして、さらに、コア径の小径化による問題点、すなわち、センタコアへの光の閉込め効果が弱まり、通光が十分に行なわれなかったり、曲げ損失が非常に大きくなってしまふことを抑制するために、サイドコア（第1サイドコア2）の外周に第1サイドコアよりも屈折率が高い第2サイドコア3を設けることにした。

そして、前記の如く、センタコアの屈折率最大値 $n_1$ と第1サイドコアの屈折率の最小値 $n_2$ と第2サイドコアの屈折率の最大値を $n_3$ と外部クラッドの屈折率 $n_c$ との関係を、 $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ とし、次に、センタコアの比屈折率差（外部クラッドの屈折率に対するセンタコアの屈折率） $\Delta_1$ の値の具体化を検討した。その結果、 $\Delta_1$ が $1.7\%$ 未満であった場合、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯における光ファイバの単位長さ当たりの分散を $-120\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 未満にする（負の分散の絶対値を $120$ よりも大きくする）ことができないし、この波長帯における直径 $20\text{mm}$ での曲げ損失が $0.5\text{dB}/\text{m}$ よりも大きくなってしまい、コイル化して用いる分散補償用の光ファイバとして適さないことが分かった。そこで、本実施形態例では、 $1.7\% \leq \Delta_1$ とした。

また、同様に、 $\Delta_2$ 、 $\Delta_3$ の値の具体化を検討したところ、 $\Delta_2$ が-

0.3%よりも大きいときや、 $\Delta 3$ が0.25%未満のときには、波長1.55  $\mu\text{m}$ 帯において、大きな負の分散あるいは分散勾配が得られなかったり、曲げやマイクロベンドによる伝送損失が増大しやすくなることが分かった。そこで、本実施形態例では、 $\Delta 2 \leq -0.3\%$ 、 $0.25\% \leq \Delta 3$ とした。

さらに、センタコア1の直径 $a_1$ を第1サイドコア2の直径 $a_2$ で割った値 $A$ が0.15未満になると、第2サイドコア3がセンタコア1から離れすぎて第2サイドコア3によるコア部への光の閉込め効果を活用することができないことが分かった。具体的には、このようにすると、波長1.55  $\mu\text{m}$ における分散値が、単峰型の屈折率プロファイルの光ファイバのように、 $-80 \text{ ps/nm/km}$ 程度となった。また、前記 $A$ の値が0.5を越えると、W型の屈折率プロファイルの小径化による、負の分散の絶対値と負の分散スロープの絶対値を共に大きくする効果が得られないことが分かった。そこで、 $0.15 \leq A \leq 0.5$ とした。

さらに、第2サイドコア3の直径 $a_3$ を第1サイドコア2の直径 $a_2$ で割った値 $B$ が2よりも大の場合も同様に、第2サイドコア3によるコア部への光の閉込め効果を活用することができないことが分かったため、 $1 < B \leq 2$ とした。

本実施形態例によれば、以上のような検討結果に基づき、光ファイバの屈折率プロファイルとコア径の比を決定したものであるから、例えば波長1.55  $\mu\text{m}$ 帯の中心波長である波長1.55  $\mu\text{m}$ における分散値を $-120 \text{ ps/nm/km}$ 未満にして、負の分散の絶対値を大きくすることができるし、波長1.55  $\mu\text{m}$ 帯における負の分散スロープの絶対値を大きくすることができる。したがって、短い長さの本実施形態例の光ファイバによって、シングルモード光ファイバの正の波長分散および正の分散スロープを効率的に補償することができる。



また、本実施形態例によれば、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  帯における曲げ損失を小さくすることができるため、コイル化して用いるのに非常に適した光ファイバとすることができる。

さらに、本実施形態例の光ファイバの屈折率プロファイルは、いわば、第7図のW型の屈折率プロファイルにおける屈折率が低いサイドコア層12の外周に、このサイドコア層12よりも屈折率が高いコア層を設けた構成であるので、この屈折率が低いコア層（第1サイドコア2）の外側のコア層（第2サイドコア3）が、W型の屈折率プロファイルのセンタコアから漏れて伝搬しない状態の光を第2サイドコア3が閉じ込める（クラッド側に逃がさない）ことにより、光がセンタコア1の中心部以外の部分にも広く分布しながら伝搬していくことになり、実質的に実効コア断面積を大きくして、伝搬する光のパワー密度を減ずることができる。また、本実施形態例において、 $\Delta 3$ の絶対値を $\Delta 2$ の絶対値より大きくすると、すなわち $|\Delta 3| > |\Delta 2|$ とすると、負の分散の絶対値と負の分散スロープの絶対値とを共に大きくしたときの他の諸特性が向上するため好ましい。

#### （具体例）

以下、本実施形態例をより具体化した具体例について説明する。表1には、上記第1実施形態例の具体例1～6として、センタコア1の比屈折率差 $\Delta 1$ 、第1サイドコア2の比屈折率差 $\Delta 2$ 、第2サイドコア3の比屈折率差 $\Delta 3$ 、センタコア1の直径 $a 1$ 、第1サイドコア2の直径 $a 2$ 、第2サイドコア3の直径 $a 3$ を、それぞれ、前記範囲内で様々に変えたときの光ファイバの特性が示されている。なお、表における（）内の記載は、それぞれの単位を示している。

ここで、表1に示す波長分散は、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  における波長分散値であり、分散勾配は、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  における分散スロープ（分散

勾配) であり、 $D/S$  は、波長  $1.55 \mu\text{m}$  における分散値  $D$  を分散スロープ  $S$  で割った  $D/S$  値である。なお、本明細書における  $D/S$  値、すなわち、使用波長帯における波長分散  $D$  を波長分散スロープ  $S$  で割った値は、使用波長帯の各波長における波長分散  $D$  を前記各波長における波長分散スロープ  $S$  で割った値を示しており、その代表値が、表 1 に示した、波長  $1.55 \mu\text{m}$  における分散値  $D$  を波長  $1.55 \mu\text{m}$  における分散スロープ  $S$  で割った値である。

(表 1)

	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	$\Delta 3$ (%)	a1 ( $\mu\text{m}$ )	a2 ( $\mu\text{m}$ )	a3 ( $\mu\text{m}$ )	波長分散 (ps/km/nm)	分散勾配 (ps/km/nm <sup>2</sup> )	D/S (nm)
具体例 1	2.3	-0.45	0.6	3	9.6	12	-187	-0.554	338
具体例 2	2	-0.45	0.8	3.13	10	12.5	-150	-1.410	106
具体例 3	2.8	-0.55	0.8	2.5	8	10	-265	-0.463	573
具体例 4	2.74	-0.56	0.75	2.64	9.4	11.75	-167	-1.017	165
具体例 5	2.76	-0.54	0.82	2.53	8.7	11.43	-215	-0.706	305
具体例 6	1.7	-0.3	0.5	3.375	12	15	-96	-0.637	151

また、表 2 には、比較例として、マッチドクラッド型の単峰構造（第 6 図参照）の屈折率プロファイルの光ファイバ（比較例 1）の構造およ

び特性と、W型（第7図参照）の屈折率プロファイルの光ファイバ（比較例2）の構造および特性が示されている。なお、この表における比較例1の $\Delta 1$ はシリカレベルに対するセンタコア1の比屈折率差、 $\Delta 2$ はシリカレベルに対する外部クラッド5の比屈折率差、 $a 1$ はセンタコア1の直径、 $a 2$ は外部クラッド5の直径をそれぞれ示しており、比較例2の $\Delta 1$ はシリカレベルに対するセンタコア1の比屈折率差、 $\Delta 2$ はシリカレベルに対するサイドコア12の比屈折率差、 $a 1$ はセンタコア1の直径、 $a 2$ はサイドコア12の直径をそれぞれ示している。また、波長分散、分散勾配、 $D/S$ は、表1と同様にして求めた値であり、表2の $A_{eff}$ は、波長 $1.55\mu m$ 帯における有効コア断面積を示している。

(表2)

	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	$a 1$ ( $\mu m$ )	$a 2$ ( $\mu m$ )	波長分散 (ps/km/nm)	分散勾配 (ps/km/nm <sup>2</sup> )	$D/S$ (nm)	$A_{eff}$ ( $\mu m^2$ )
比較例1	2.8	-0.4	2.5	125	-78	0.053	-1472	12.1
比較例2	2.0	-0.56	2.6	8.4	-105	-0.345	304	14.8

なお、表2における各比屈折率差 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ は、真空の屈折率を1としたときのシリカの屈折率を $n_s$ とし、センタコア1の屈折率を $n_1$ とし、比較例1においてはクラッド5の屈折率を $n_2$ とし、比較例2においてはサイドコア12の屈折率を $n_2$ としたとき、次式(4)、(5)により定義されるものであり、その単位は、%である。

$$\Delta 1 = [ \{ (n_1)^2 - (n_s)^2 \} / 2 (n_s)^2 ] \times 100 \dots \quad (4)$$

$$\Delta^2 = [ \{ (n_2)^2 - (n_s)^2 \} / 2 (n_s)^2 ] \times 100 \dots \quad (5)$$

表 1 に示すように、具体例 1 ～ 5 の光ファイバは、いずれも、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における波長分散が  $-120 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$  未満となり、波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯における分散スロープは負の値となり、分散スロープの絶対値は比較例 1、2 よりも大きくなった。また、具体例 6 の光ファイバは、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における波長分散は  $-120 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$  以上であるが、波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯における負の分散スロープの絶対値が大きい。

このように、具体例 1 ～ 6 に示す本実施形態例の光ファイバは、比較例 1、2 に比べ、波長 1.55  $\mu\text{m}$  における負の分散の絶対値と波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯における負の分散スロープの絶対値の一方又は両方が大きい光ファイバとすることができた。

また、具体例 2、4、6 においては、前記  $D/S$  値が 0 ～ 300 の小さい値となった。使用波長帯における分散および分散スロープが共に負で、かつ、前記  $D/S$  値が 0 ～ 300 の小さい光ファイバを用いると、1.3  $\mu\text{m}$  帯零分散シングルモード光ファイバ等の波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯における正の分散及び正の分散スロープを共に、短い長さの光ファイバによって補償することができる。

なお、 $D/S$  値が小さく、かつ、負の分散の絶対値が大きいということは、負の分散の絶対値と負の分散スロープの絶対値が共に大きいことを示しているので、上記効果を奏することができる。そして、 $D/S$  値は上記範囲内で小さいほど、補償可能なシングルモード光ファイバの分散特性の範囲を拡張することができ、また、シングルモード光ファイバの分散特性の補償手段の範囲を拡張することができる点で好ましいものであるが、例えば  $D/S$  値が、上記範囲よりも大きくても、 $D/S$  値が

0～500の範囲内であれば、1.3 $\mu\text{m}$ 帯零分散シングルモード光ファイバ等の波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯における正の分散及び正の分散スロープを共に、短い長さの光ファイバによって補償することができる。

本発明者が、波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯における分散および分散スロープが共に負で、かつ、前記D/S値が小さい光ファイバの具体例として、波長1550nmにおける波長分散が $-135.7\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 、波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯における分散スロープが $-0.513\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 、前記D/S値が約265と成している光ファイバを作製し、この光ファイバを前記シングルモード光ファイバに接続して光伝送路を形成したところ、この光伝送路における波長分散特性は、第3図の実線に示すような特性となった。この光伝送路は、シングルモード光ファイバの長さと光ファイバの長さの比を9：1として形成した。

同図から明らかなように、本実施形態例の光ファイバを用いると、短い長さでシングルモード光ファイバの波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯における分散スロープを補償し、分散スロープをほぼ零にすることができ、使用波長域での波長分散偏差を低く抑えられることが分かった。

また、本発明者が、本実施形態例のさらに別の具体例として、波長1550nmにおける波長分散が $-171\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 、波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯における分散スロープが $-0.851\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 、前記D/S値が約200と成している光ファイバAと、波長1550nmにおける波長分散が $-196\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 、波長1.55 $\mu\text{m}$ 帯における分散スロープが $-0.109\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ 、前記D/S値が約1798と成している光ファイバBをそれぞれ作製し、これらの光ファイバAとBを前記シングルモード光ファイバに接続して光伝送路を形成したところ、この光伝送路の波長分散特性は第4図の実線に示すものとなった。

なお、この光伝送路は、長さが 1 6 k m の前記シングルモード光ファイバと、長さが 1 k m の光ファイバ A と、長さが 0 . 5 5 5 k m の光ファイバ B を接続して形成した。同図から明らかなように、本実施形態例の光ファイバを用いると、短い長さの光ファイバで前記シングルモード光ファイバの波長 1 . 5 5  $\mu$  m 帯における波長分散と分散スロープを共に補償し、分散スロープをほぼ零（分散スロープの絶対値を  $\pm 0 . 0 1$  以下）にできるし、分散値もほぼ零にできることが分かった。

なお、長さが 1 6 k m の前記シングルモード光ファイバを、第 7 図に示す W 型の屈折率プロファイルの光ファイバのみで補償しようとする、2 . 7 k m の光ファイバが必要となることから、本実施形態例の光ファイバを用いることにより、必要とする光ファイバの長さを 4 割も短くすることができ、それにより、光ファイバを用いた分散補償器の小型化や光ファイバ内で生じる非線形現象の低減化も図ることができる。

表 3 には、本実施形態例のさらに別の具体例として、波長 1 . 5 5  $\mu$  m 帯における有効コア断面積  $A_{eff}$  を拡大した光ファイバの例（具体例 7 , 8）が示されている。なお、表 3 において、比屈折率差  $\Delta 1 \sim \Delta 3$  は、前記式（1）～（3）により求めた。また、表 3 における波長分散、分散勾配、 $D/S$ 、 $A_{eff}$  の値は、表 1、2 と同様にして求めた値である。

（表 3）

	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	$\Delta 3$ (%)	$a1$ ( $\mu\text{m}$ )	$a2$ ( $\mu\text{m}$ )	$a3$ ( $\mu\text{m}$ )	波長分散 (ps/km/nm)	$A_{\text{eff}}$ ( $\mu\text{m}^2$ )
具体例 7	2.8	-0.55	0.96	2.2	7.3	10.2	-90	115
具体例 8	2.3	-0.45	0.75	2.6	8.4	10.5	-110	82

この具体例によれば、前記比較例 1, 2 に比べ、波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯における有効コア断面積を格段に大きくすることができ、それにより、非線形現象による歪みを低減することができる。

表 4 には、本実施形態例のさらに別の具体例として、第 5 図の (a) に示すように、第 2 サイドコア 3 が屈折率極大部を有して、この屈折率極大部における屈折率最大部 3 a の位置を第 2 サイドコア 3 の径方向の幅中心部 (図の C) よりも第 1 サイドコア 2 側寄りと成した具体例 9 a、9 b の光ファイバの特性が示されている。

(表 4)



	ピーク位置	実効遮断 波長 (nm)	分散 (ps/km/nm)	分散勾配 (ps/km/nm <sup>2</sup> )	D/S (nm)
具体例9a	0.07	1529	-185.2	-1.186	156.2
具体例9b	0.31	1523	-214.1	-0.975	219.6
比較例3	0.51	1515	-288.4	0.412	-700.0
比較例4	0.96	1526	-140.3	1.916	-73.2
比較例5		1519	-3.3	0.152	-21.8

なお、表4に示す波長分散は、波長1.55 $\mu$ mにおける波長分散値であり、分散勾配は、波長1.55 $\mu$ mにおける分散スロープ（分散勾配）であり、D/Sは、波長1.55 $\mu$ mにおける分散値Dを分散スロープSで割ったD/S値である。また、表4に示すピーク位置とは、第

5 図の (a) に示すように、第 2 クラッド 3 の屈折率極大最大部 3 a の位置を、第 1 サイドコア 2 と第 2 サイドコア 3 との界面位置を 0、第 2 サイドコア 3 と外部クラッド 5 との界面位置を 1 として示したものである。

また、表 4 には、比較例 3、4 として、第 2 サイドコア 3 の屈折率極大部における屈折率最大部の位置を第 2 サイドコア 3 の径方向幅中心部 (図の C) よりも外部クラッド 5 側寄りとした光ファイバの特性と、比較例 5 として、第 5 図の (b) に示すように、第 2 サイドコア 3 が屈折率極大部をもたない平坦な屈折率分布の光ファイバの特性も共に示されている。

なお、表 4 に示す各光ファイバについて、具体的な屈折率プロファイルは示されていないが、いずれも、第 1 実施形態例で定めた屈折率プロファイルの範囲内で、実効遮断波長が 1 5 5 0 n m 未満になるように屈折率プロファイルを決めたものである。

本発明者は、上記屈折率差  $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、 $\Delta 3$  および、センタコア 1 の直径  $a 1$  と第 1 サイドコア 2 の直径  $a 2$  と第 2 サイドコア 3 の直径  $a 3$  の各パラメータを、第 1 実施形態例で特定した範囲内で設定することにより、例えば波長 1. 5 5  $\mu m$  帯といった使用波長帯における単位長さあたりの負の分散の絶対値と負の分散スロープの絶対値を共に大きくし、短い長さでシングルモード光ファイバの正の分散を前記使用波長帯の広帯域において補償できるようにしようとしたときに、上記それぞれのパラメータの設定値によっては実効遮断波長が使用波長帯よりも長波長側になってしまう場合もあることを知った。

そこで、本発明者は、実効遮断波長を使用波長帯よりも短波長側にしてシングルモード動作可能とするために、様々な検討を行ない、具体例 9 a、9 b に示すように、第 2 サイドコア 3 の屈折率最大部 3 a の位置

を第2サイドコア3の径方向幅中心部（図のC）よりも第1サイドコア2側寄りにすることにより、実効遮断波長を短波長側にして、かつ、前記の如く、波長1.55  $\mu\text{m}$ 帯といった使用波長帯における単位長さあたりの負の分散の絶対値と負の分散スロープの絶対値を共に大きくできることを見出した。

この理由を、本発明者は以下のように考察している。すなわち、光ファイバの伝搬モードのうち、 $LP_{0,m}$  ( $m=2, 3, \dots$ )あるいは $LP_{1,1}$ モードは光ファイバ径方向の広い範囲に電界分布を有するものであるため、第2サイドコア3の屈折率最大部を第2サイドコア3の径方向幅中心部よりも第1サイドコア2側寄りとすることにより、光ファイバを伝搬する光の $LP_{0,1}$ モードへの影響を小さくとどめながら、上記 $LP_{0,m}$ モードや $LP_{1,1}$ モードへの光が伝搬しないようにして、シングルモード動作できるようになるものと考察している。

具体例9a、9bは、この検討に基づいて構成パラメータを決定したものであり、したがって、具体例9a、9bについても、表4に示したように、上記優れた効果を奏することができる。

なお、表4に示した結果について、補足すると、比較例3、4は、第2サイドコア3の屈折率最大部3aの位置を表4のように設定したうえで、実効遮断波長が1550nm未満になるように屈折率プロファイルを決めたことによって、表4に示すように分散勾配が正の値になってしまっており、比較例4においては、分散値の絶対値も小さくなっている。また、比較例5は、第5図の（b）に示す屈折率プロファイルにより、実効遮断波長が1550nm未満になるように屈折率プロファイルを決めたことによって、同様に、分散勾配が正の値になってしまい、分散値の絶対値は非常に小さくなっている。

それに対し、具体例9a、9bは上記優れた効果を奏するものであり

、第2サイドコア3の屈折率極大最大部3aの位置を第2サイドコア3の半径方向幅中心部よりも第1サイドコア2側寄りの適宜の位置にすることにより、所望の特性を得ることができる。

次に、本発明に係る光ファイバの第2実施形態例について説明する。第2図には、第2実施形態例の屈折率プロファイルが示されている。第2実施形態例は上記第1実施形態例とほぼ同様に構成されており、第2実施形態例が上記第1実施形態例と異なる特徴的なことは、第2サイドコア3の外周側を内部クラッド部4で覆い、内部クラッド部4の外周側を外部クラッド5で覆う構成とし、内部クラッド部4の屈折率を外部クラッド5の屈折率 $n_c$ よりも小さくしたことである。

なお、内部クラッド部4の屈折率は $n_4$ であり（真空の屈折率を1としたときの値で示す）、外部クラッド5に対する内部クラッド部4の比屈折率差を $\Delta_4$ とすると、 $\Delta_4 > \Delta_2$ と成している。 $\Delta_4$ は、次式（6）により定義される。

$$\Delta_4 = \left[ \{ (n_4)^2 - (n_c)^2 \} / 2 (n_c)^2 \right] \times 100 \dots \quad (6)$$

第2実施形態例は以上のように構成されており、その特徴的なことは、第2サイドコア3の外周側に屈折率が低い内部クラッド部4を設けることにより、コア径方向の広い範囲に電界分布を有する $LP_{11}$ モードを漏れやすくし、実効遮断波長（カットオフ波長）を短波長化するようにしたことである。

本発明のように、屈折率が低い第1サイドコア2の周りに屈折率が高い第2サイドコア3を設けた場合、高負分散、高負分散勾配は実現されるが、光ファイバの屈折率プロファイルによっては、実効遮断波長が長波長化してしまうものもある。そうになると、光ファイバがシングルモード動作できなくなるため、実効遮断波長の長波長化を確実に抑制するた

めに、前記の如く第2サイドコア3の外周側に屈折率が低い内部クラッド部4を設けることにより、実効遮断波長を短波長化するようにし、光ファイバがシングルモード動作しやすいように屈折率プロファイルが決定されている。

(具体例)

表5には、第2実施形態例の具体例として、具体例11の光ファイバの構成および特性が、内部クラッド部4を有していない、上記第1実施形態例の光ファイバの具体例10と共に示されている。なお、比屈折率差 $\Delta 1 \sim \Delta 3$ は、前記式(1)～(3)により求めた。また、表5における波長分散、分散勾配、 $D/S$ 、 $A_{eff}$ の値は、表1、2と同様にし求めた値である。

(表5)

	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	$\Delta 3$ (%)	$\Delta 4$ (%)	a1 ( $\mu\text{m}$ )	a2 ( $\mu\text{m}$ )	a3 ( $\mu\text{m}$ )	a4 ( $\mu\text{m}$ )	波長分散 (ps/km/nm)	分散勾配 (ps/km/nm <sup>2</sup> )	D/S (nm)	Aeff ( $\mu\text{m}^2$ )	実効遮断 波長 (nm)
具体例 10	2.83	-0.59	0.72	無し	2.86	10.2	12.7	無し	-200	-1.185	168	16	1621
具体例 11	2.83	-0.59	0.72	-0.08	2.85	10.1	12.7	19	-203	-1.037	195	18	1468

この表 5 から明らかなように、内部クラッド部 4 を設けることにより

、実効遮断波長を短波長化することができ、さらに、 $A_{eff}$ も大きくすることができた。なお、第2サイドコア3の外周側に屈折率が低い内部クラッド部4を設ける場合、第2サイドコア3の極大最大部3aは必ずしも第2サイドコア3の径方向幅中心部Cより第1サイドコア2側寄りとする必要はないが、効遮断波長をより一層短波長化し、かつ、 $A_{eff}$ のさらなる大径化を図る上では、第2サイドコア3の極大最大部3aは第2サイドコア3の径方向幅中心部Cより第1サイドコア2側寄りとすることが望ましい。

本発明は上記各実施形態例に限定されることはなく、様々な実施の態様を採り得る。例えば、第4図に示したデータは、前記D/S値が0～300の値と成している本発明の光ファイバと、前記D/S値が300より大きい光ファイバとを前記シングルモード光ファイバに接続して形成したが、光伝送路を、前記D/S値が0～300の値と成している本発明の光ファイバと、前記D/S値が負の光ファイバとを前記シングルモード光ファイバに接続して形成し、それにより、第4図に示したように、使用波長帯における分散スロープと分散値を共にほぼ零としてもよい。また、使用波長帯における分散スロープのみをほぼ零としてもよい。また、本発明の光ファイバと接続されるシングルモード光ファイバは、使用波長帯より短波長側に零分散波長を有するものであればよく、例えば、使用波長帯において微小分散を有する分散シフト光ファイバ等であってもよい。

さらに、上記各実施形態例において、第1図、第2図、第5図にそれぞれ示したように、第2サイドコア3は1つの屈折率極大部を有していたが、2つ以上の屈折率極大部を有していてもよい。この場合も、複数の屈折率極大部のうち屈折率最大部の位置を第2サイドコア3の径方向幅中心部よりも第1サイドコア2側寄りと成すことにより、具体例9a

、 9 b に示したような、実効遮断波長を短波長側にしつつ、負の分散の絶対値と負の分散勾配の絶対値を共に大きい光ファイバの実現を図ることができる。

#### 産業上の利用可能性

以上のように本発明に係る光ファイバは、使用波長帯より短波長側、例えば  $1.3 \mu\text{m}$  の波長帯に零分散を持つシングルモード光ファイバを伝搬する波長  $1.55 \mu\text{m}$  帯の光信号の正の分散と正の分散スロープを短いファイバ長で補償するのに適している。また、本発明に係る光伝送路は、波長多重の各波長光（特に  $1.55 \mu\text{m}$  帯の波長光）に対して受信側でほぼ零分散を可能とし、非線形現象を抑制し、伝搬特性に優れた、高速大容量の高品質波長多重通信の光伝送路として適している。



## 請 求 の 範 囲

1. センタコアの外周側を第1サイドコアで覆い、該第1サイドコアの外周側を第2サイドコアで覆い、該第2サイドコアの外周側を外部クラッドで覆って形成される光ファイバであって、前記センタコアの屈折率の最大値を $n_1$ とし、前記第1サイドコアの屈折率の最小値を $n_2$ とし、前記第2サイドコアの屈折率の最大値を $n_3$ とし、前記外部クラッドの屈折率を $n_c$ としたとき、 $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ と成しており、前記外部クラッドに対する前記センタコアの比屈折率差を $\Delta_1$ とし、前記外部クラッドに対する前記第1サイドコアの比屈折率差を $\Delta_2$ とし、前記外部クラッドに対する前記第2サイドコアの比屈折率差を $\Delta_3$ としたときに、 $1.7\% \leq \Delta_1$ 、 $\Delta_2 \leq -0.3\%$ 、 $0.25\% \leq \Delta_3$ と成し、前記センタコアの直径 $a_1$ を前記第1サイドコアの直径 $a_2$ で割った値 $A$ が $0.15 \leq A \leq 0.5$ 、前記第2サイドコアの直径 $a_3$ を前記第1サイドコアの直径 $a_2$ で割った値 $B$ が $1 < B \leq 2$ と成していることを特徴とする光ファイバ。

2. 第2サイドコアは1つ以上の屈折率極大部を有し、この1つ以上の屈折率極大部のうち屈折率最大部の位置が第2サイドコアの径方向の幅中心部よりも第1サイドコア側寄りと成していることを特徴とする請求の範囲第1項記載の光ファイバ。

3. 第2サイドコアの外周側を内部クラッド部で覆い、該内部クラッド部の外周側を外部クラッドで覆う構成とし、前記内部クラッド部の屈折率を前記外部クラッドの屈折率よりも小さくしたことを特徴とする請求の範囲第1項記載の光ファイバ。

4. 第2サイドコアの外周側を内部クラッド部で覆い、該内部クラッド部の外周側を外部クラッドで覆う構成とし、前記内部クラッド部の屈折

率を前記外部クラッドの屈折率よりも小さくしたことを特徴とする請求の範囲第2項記載の光ファイバ。

5. 使用波長帯における波長分散を $-120 \text{ ps/nm/km}$ 未満としたことを特徴とする請求の範囲第1項記載の光ファイバ。

6. 使用波長帯における波長分散を $-120 \text{ ps/nm/km}$ 未満としたことを特徴とする請求の範囲第2項記載の光ファイバ。

7. 使用波長帯における波長分散を $-120 \text{ ps/nm/km}$ 未満としたことを特徴とする請求の範囲第3項記載の光ファイバ。

8. 使用波長帯における波長分散を $-120 \text{ ps/nm/km}$ 未満としたことを特徴とする請求の範囲第4項記載の光ファイバ。

9. 使用波長帯における波長分散 $D$ を波長分散スロープ $S$ で割った $D/S$ 値を $0 \sim 500 \text{ nm}$ としたことを特徴とする請求の範囲第1項乃至第8項のいずれか一つに記載の光ファイバ。

10. 使用波長帯における波長分散 $D$ を波長分散スロープ $S$ で割った $D/S$ 値を $0 \sim 300 \text{ nm}$ としたことを特徴とする請求の範囲第1項乃至第8項のいずれか一つに記載の光ファイバ。

11. 使用波長帯は波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯としたことを特徴とする請求の範囲第5項記載の光ファイバ。

12. 使用波長帯は波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯としたことを特徴とする請求の範囲第6項記載の光ファイバ。

13. 使用波長帯は波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯としたことを特徴とする請求の範囲第7項記載の光ファイバ。

14. 使用波長帯は波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯としたことを特徴とする請求の範囲第8項記載の光ファイバ。

15. 使用波長帯は波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯としたことを特徴とする請求の範囲第9項記載の光ファイバ。

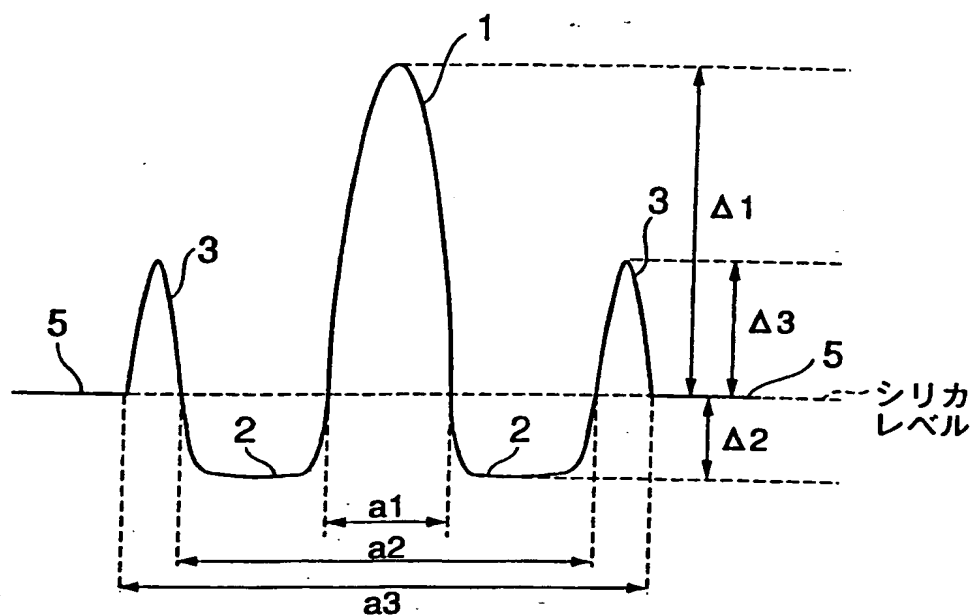
16. 使用波長帯は波長  $1.55\ \mu\text{m}$  帯としたことを特徴とする請求の範囲第10項記載の光ファイバ。

17. 使用波長帯よりも短波長側の波長帯に零分散をもつシングルモード光ファイバに請求の範囲第1項乃至第16項のいずれか一つに記載の光ファイバを接続することにより使用波長帯における分散スロープをほぼ零としたことを特徴とする光伝送路。

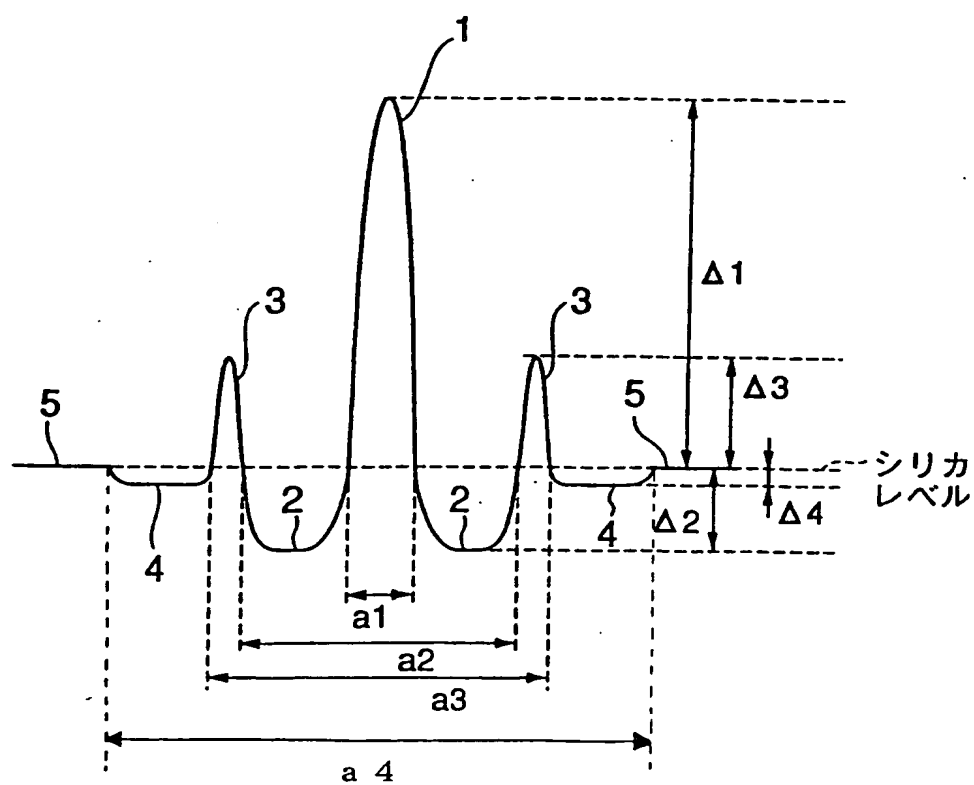
18. 使用波長帯よりも短波長側の波長帯に零分散をもつシングルモード光ファイバに、請求の範囲第1項乃至第16項のいずれか一つに記載の光ファイバと、使用波長帯における波長分散  $D$  を波長分散スロープ  $S$  で割った  $D/S$  値が  $300\ \text{nm}$  より大きい光ファイバ又は前記  $D/S$  値が負の光ファイバとを接続することにより使用波長帯における分散スロープと分散値を共にほぼ零としたことを特徴とする光伝送路。

1 / 4

第1図

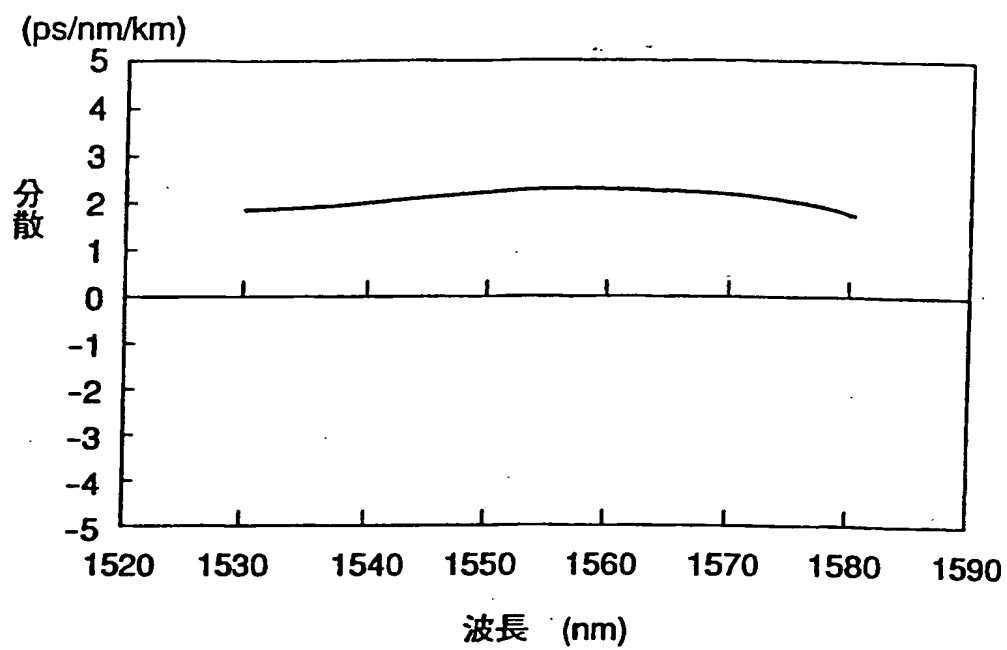


第2図

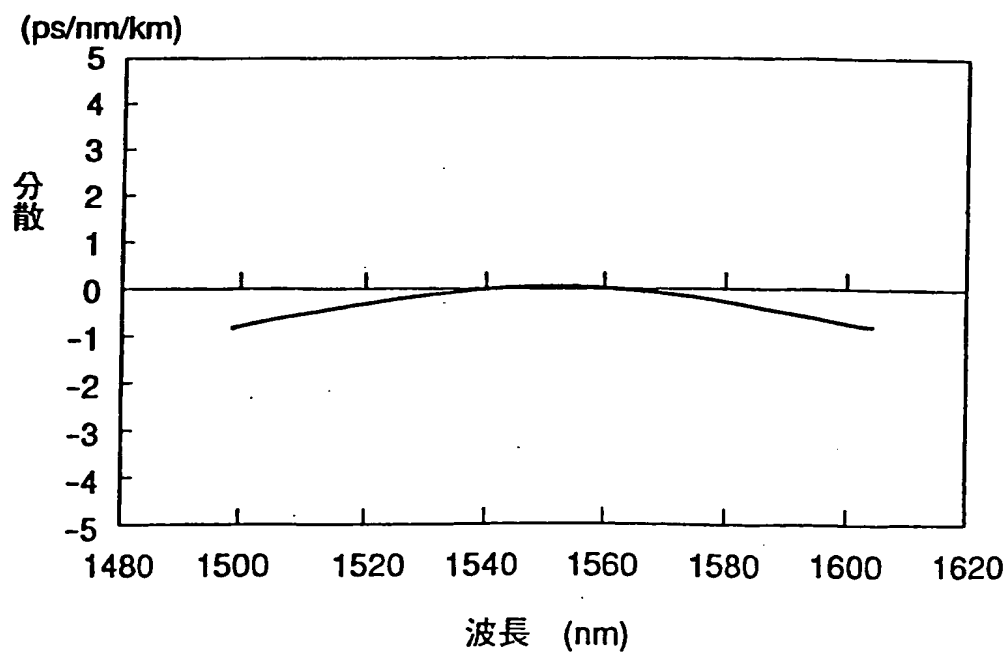


2 / 4

第3図

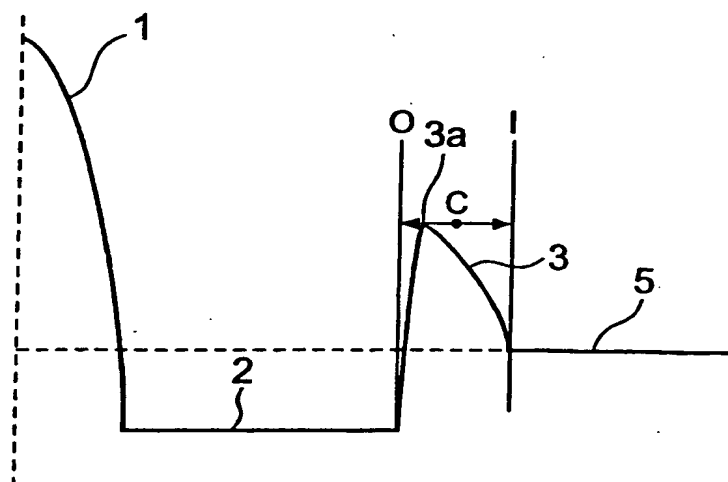


第4図

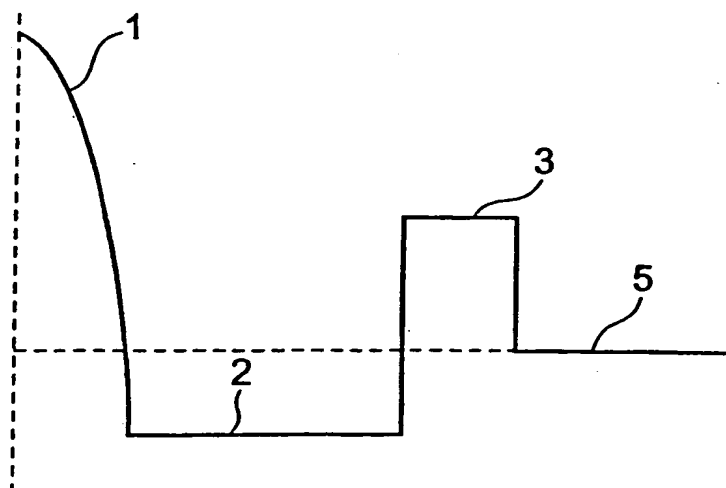


第5図

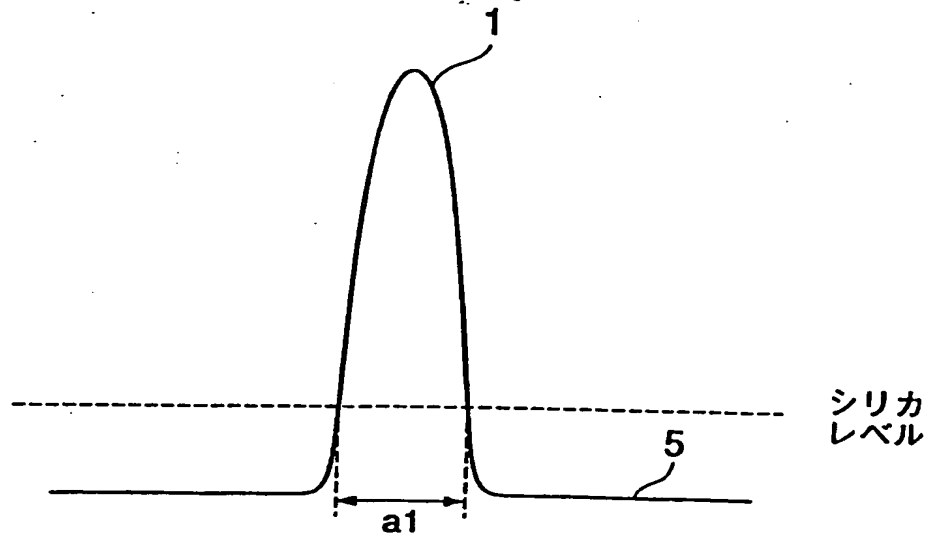
(a)



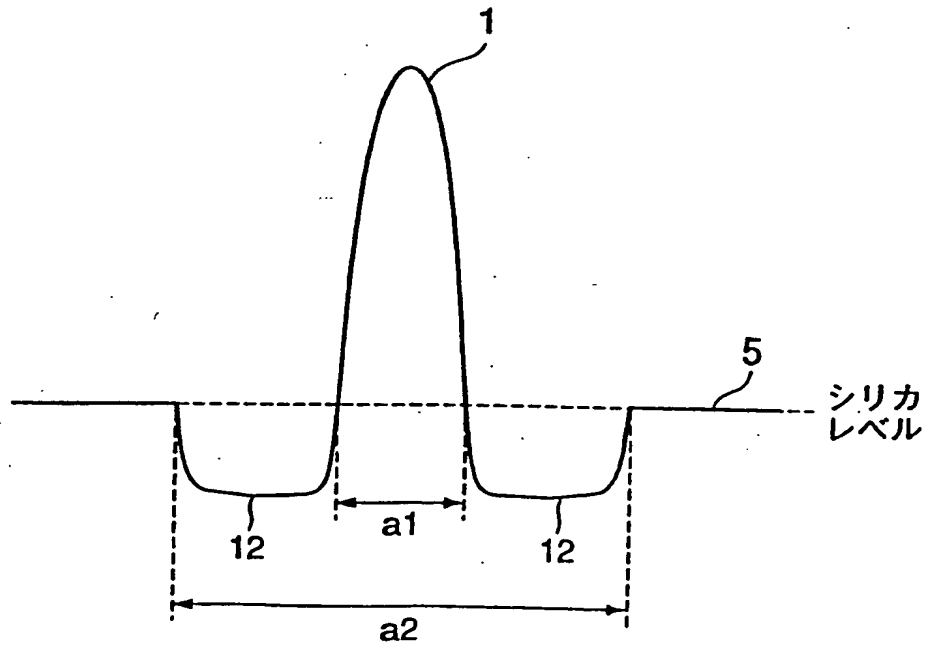
(b)



第6図



第7図



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/03148

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
Int.Cl<sup>7</sup> G02B 6/22, 6/16

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> G02B 6/22, 6/16

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2000
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2000	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2000

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO, 98/04941, A1 (CORNING INC.), 05 February, 1998 (05.02.98), Table 1,2; Figs. 1-3; especially, see Index 6 in Table 1 and Index 22-23 in Table 2	1-2, 5-6, 9-12, 15-18
Y	Claim 4-6; Table 1; Figs. 1,3 & JP, 11-507445, A & EP, 857313, A1	3-4, 7-8, 13-14
X	EP, 598554, A1 (AMERICAN TELEPHONE AND TELEGRAPH COMPANY), 25 May, 1994 (25.05.94),	1, 5, 9-11, 15-18 3, 7, 13
Y	Figs. 1-5 & JP, 6-222235, A	
X	US, 5448674, A (VENGSARKAR ANISH M.), 05 September, 1995 (05.09.95)	1, 5, 9-11, 15-18 3, 7, 13
Y	& JP, 7-270636, A & EP, 668520, A2	
X	JP, 10-319266, (Fujikura Ltd.), 04 December, 1998 (04.12.98),	1, 5, 9-11, 15-18 3, 7, 13
Y	Par. No. 30; Tables 1; Figs. 1,2 (Family: none)	

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search  
14 August, 2000 (14.08.00)

Date of mailing of the international search report  
29 August, 2000 (29.08.00)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/03148

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	VENGSARKAR A. M. ET AL.: Dispersion-compensating single-mode fibers: efficient designs for first- and seconde-order compensation; OPTICS LETTERS, 01 JUNE 1993, VOL.18, NO.11, pp.924-926	1,5,9-11,15-18 3,7,13
X Y	SEMENOV V. A. ET AL.: Broadband dispersion-compensating firber for high-bit-rate transmission network use; APPLIED OPTICS, 20 August 1995, Vol.34, No.24, pp.5331-5337	1,5,9-11,15-18 3,7,13
Y	US, 4715679, A (BHAGAVATULA VENKATA A.), 29 December, 1987 (29.12.87) & JP, 58-104040, A & JP, 59-226301, A & EP, 127408, A	3-4,7-8, 13-14
A	US, 5361319, A (ANTOS A. JOSEPH), 01 November, 1994 (01.11.94), figs. 8,8a & JP, 6-11620, A & EP, 554714, A	1-18
A	US, 5838867, A (ONISHI MASASHI), 17 November, 1998 (17.11.98), Figs. 5-9, Fig. 11 & JP, 10-39155, A	1-18
P,Y	WO, 00/17684, A1 (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 30 March, 2000 (30.03.00) (Family: none)	1-18

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G02B 6/22, 6/16

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G02B 6/22, 6/16

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年

日本国公開実用新案公報 1971-2000年

日本国登録実用新案公報 1994-2000年

日本国実用新案登録公報 1996-2000年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	WO, 98/04941, A1 (CORNING INC.), 5.2月.1998(05.02.98), Table 1,2; FIG.1-3; 特に、Table 1のIndex 6, Table 2のIndex 22-23を参照.	1-2, 5-6, 9-12, 15-18
Y	Claim 4-6; Table 1; Fig.1,3 & JP, 11-507445, A&EP, 857313, A1	3-4, 7-8, 13-14

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

14.08.00

国際調査報告の発送日

29.08.00

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

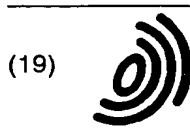
福田 聡

2K

9514

電話番号 03-3581-1101 内線 3253

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	EP, 5 9 8 5 5 4, A 1 (AMERICAN TELEPHONE AND TELEGRAPH COMPANY), 25.5月.1994(25.05.94), Fig.1-5	1, 5, 9-11, 15-18
Y	& JP, 6-2 2 2 2 3 5, A	3, 7, 13
X	US, 5 4 4 8 6 7 4, A (VENGSARKAR ANISH M.), 5.9月.1995(05.09.95)	1, 5, 9-11, 15-18
Y	& JP, 7-2 7 0 6 3 6, A & EP, 6 6 8 5 2 0, A 2	3, 7, 13
X	JP, 1 0-3 1 9 2 6 6, (株式会社フジクラ), 4.12月.1998(04.12.98), 第30段落; 表1; 第1, 2図 (ファミリーなし)	1, 5, 9-11, 15-18
Y		3, 7, 13
X	VENGSARKAR A. M. ET AL.: Dispersion-compensating single-mode fibers: efficient designs for first- and seconde-order compensation; OPTICS LETTERS, 1 JUNE 1993, VOL.18, NO.11, pp.924-926	1, 5, 9-11, 15-18
Y		3, 7, 13
X	SEMENOV V. A. ET AL.: Broadband dispersion-compensating fiber for high-bit-rate transmission network use; APPLIED OPTICS, 20 August 1995, Vol.34, No.24, pp.5331-5337	1, 5, 9-11, 15-18
Y		3, 7, 13
Y	US, 4 7 1 5 6 7 9, A (BHAGAVATULA VENKATA A.), 29.12月.1987(29.12.87)	3-4, 7-8, 13-14
	& JP, 5 8-1 0 4 0 4 0, A & JP, 5 9-2 2 6 3 0 1, A & EP, 1 2 7 4 0 8, A	
A	US, 5 3 6 1 3 1 9, A (ANTOS A. JOSEPH), 1.11月.1994(01.11.94), fig.8, 8a	1-18
	& JP, 6-1 1 6 2 0, A & EP, 5 5 4 7 1 4, A	
A	US, 5 8 3 8 8 6 7, A (ONISHI MASASHI), 17.11月.1998(17.11.98), Fig.5-9, Fig.11	1-18
	& JP, 1 0-3 9 1 5 5, A	
P, Y	WO, 0 0/1 7 6 8 4, A 1 (住友電気工業株式会社), 30.3月.2000(30.03.00) (ファミリーなし)	1-18



Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) **EP 1 107 028 A1**

(12)

**EUROPEAN PATENT APPLICATION**  
published in accordance with Art. 158(3) EPC

(43) Date of publication:  
13.06.2001 Bulletin 2001/24

(51) Int Cl.7: **G02B 6/22**

(21) Application number: 00927783.1

(86) International application number:  
**PCT/JP00/03148**

(22) Date of filing: 17.05.2000

(87) International publication number:  
**WO 00/70378 (23.11.2000 Gazette 2000/47)**

(84) Designated Contracting States:  
**AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU  
MC NL PT SE**

- **SUGIZAKI, Ryuichi**  
The Furukawa Electric Co., Ltd.  
Tokyo 100-8322 (JP)
- **AISO, Keiichi** The Furukawa Electric Co., Ltd.  
Tokyo 100-8322 (JP)

(30) Priority: 17.05.1999 JP 13579999  
19.04.2000 JP 2000118217

(71) Applicant: **THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD.**  
Tokyo 100-8322 (JP)

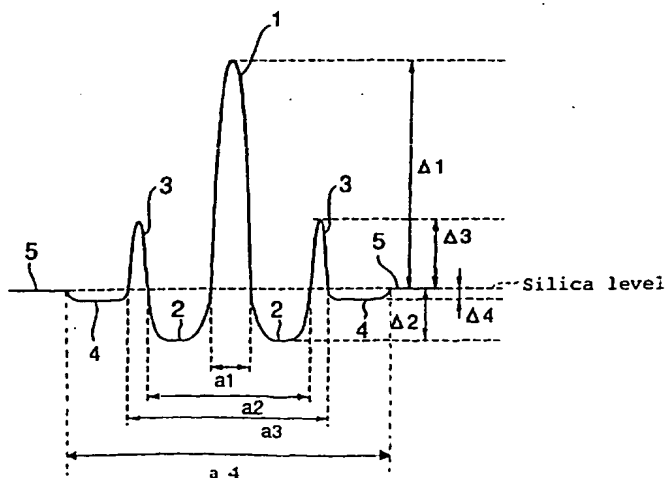
(74) Representative: **Dealtry, Brian et al**  
Eric Potter Clarkson,  
Park View House,  
58 The Ropewalk  
Nottingham NG1 5DD (GB)

(72) Inventors:  
• **ARAI, Shinichi** The Furukawa Electric Co., Ltd.  
Tokyo 100-8322 (JP)

**(54) OPTICAL FIBER AND OPTICAL TRANSMISSION LINE COMPRISING THE OPTICAL FIBER**

(57) The present invention provides an optical fiber which has negative dispersion and negative dispersion slope in a wavelength band in use, and can carry out single-mode operation in which distortion due to the non-linear phenomenon can be suppressed so as to be suitable for wavelength multiplexed optical transmissions. When the relative index differences of center core (1), first side core (2), second side core (3), and inner cladding (4) from the silica level are  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$ ,  $\Delta 3$ , and  $\Delta 4$ ,  $1.7\% \leq \Delta 1$ ,  $\Delta 2 \leq -0.3\%$ ,  $0.25\% \leq \Delta 3$ , and  $\Delta 4 < 0$ . Furthermore, the value A, determined by dividing the diameter

$a_1$  of the center core 1 by the diameter  $a_2$  of the first side core 2, is set to  $0.15 \leq A \leq 0.2$ , and the value B, determined by dividing the diameter  $a_3$  of the second side core 2 by the diameter  $a_2$  of the first side core 3, is set to  $1 < B \leq 2$ . By such an arrangement, the absolute values of the negative dispersion and negative dispersion slope in a wavelength band of  $1.55 \mu\text{m}$  can be made large, and in addition, light is confined within the core by the second side core (3), the effective core sectional area is made larger, and inner cladding (4) is provided, whereby the effective cut-off wavelength is shortened.



EP 1 107 028 A1

## Description

## Technical Field

5 [0001] The present invention relates to an optical fiber which is suitable for wavelength multiplexed optical transmissions in, for example, a wavelength band of a  $1.55\mu\text{m}$  wavelength and a wavelength multiplexed optical transmission line using the same optical fiber.

## Background Art

10 [0002] As a transmission network for optical transmissions, a single-mode optical fiber having zero dispersion in a wavelength band of a  $1.3\mu\text{m}$  wavelength has been laid across the world. Recently, in accordance with development of the information society, information transmission capacities tend to significantly increase. In accordance with such an increase in information, wavelength multiplexed transmissions (WDM transmissions) are widely accepted in the transmission field, and now the age of wavelength multiplexed transmissions has been entered. Wavelength multiplexed transmissions are the method for transmitting a plurality of light signals which are not on one wavelength but are divided into a plurality of wavelengths, which is suitable for large-capacity and high-rate transmissions.

15 [0003] However, in the case where an existing single-mode optical fiber in operation for transmissions which has zero dispersion near  $1.3\mu\text{m}$  is used and a wavelength band near  $1.3\mu\text{m}$  is used to carry out wavelength multiplexed optical transmissions, this wavelength band does not coincide with the  $1.55\mu\text{m}$  wavelength band (for example,  $1530\text{nm}$  to  $1570\text{nm}$ ) of the gain bandwidth (including  $1500\text{nm}$  to  $1650\text{nm}$ ) of a general optical amplifier using an erbium doped optical fiber. Therefore, in the case where optical transmissions are carried out by using a wavelength band near  $1.3\mu\text{m}$ , the optical amplifier cannot be used, and therefore, trouble may occur in long-distance optical transmissions. In order to solve this problem, recently, wavelength multiplexed optical transmissions in a wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  are carried out by using an optical amplifier and an existing single-mode optical fiber having zero dispersion in a wavelength band of  $1.3\mu\text{m}$ .

20 [0004] However, when optical transmissions are carried out in a wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  by using the single-mode optical fiber having zero dispersion near  $1.3\mu\text{m}$ , the existing single-mode optical fiber has positive dispersion of approximately  $17\text{ps/nm/km}$  in a central wavelength of  $1.55\mu\text{m}$  of the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$ , and furthermore, the single-mode optical fiber has a positive dispersion slope of approximately  $0.06\text{ps/nm}^2/\text{km}$  in a wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$ . Therefore, distortion in waveform of the light signals of the respective multiplexed wavelengths increases as the light signals are transmitted in the single-mode optical fiber, separation and distinction of the signals at the receiver side become difficult, the quality of optical transmissions deteriorates, and the reliability of optical transmissions is lost.

25 [0005] Furthermore, as a transmission network for optical transmissions, a dispersion shifted optical fiber whose wavelength of zero dispersion is shifted to be close to  $1.55\mu\text{m}$  which is the gain bandwidth of an optical amplifier has been proposed. When dispersion in wavelength in optical transmissions becomes close to zero, since a non-linear phenomenon called four wave mixing becomes easy to generate, in particular, in wavelength multiplexed transmissions, a dispersion shifted optical fiber having minute dispersion of a degree at which a non-linear phenomenon is not generated in the wavelengths for optical transmissions has been demanded.

30 [0006] However, if a dispersion shifted optical fiber having the abovementioned minute dispersion is used for long-distance optical transmissions, since the influence of the minute dispersion cannot be ignored, it is difficult to dependently use the dispersion shifted optical fiber having minute dispersion for long-distance large-capacity and high-rate transmissions.

35 [0007] Therefore, in order to solve such a problem, a method has been proposed in which, to compensate for dispersion in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  of a  $1.3\mu\text{m}$  zero dispersion single-mode optical fiber, an optical fiber having great negative dispersion in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  is inserted into the single-mode optical fiber transmission line, whereby positive dispersion in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  of the single-mode optical fiber is compensated, and deterioration in transmission signals due to chromatic dispersion is suppressed.

40 [0008] As an example of the optical fiber for compensating the dispersion, for example, an optical fiber having a refractive index profile of a single-peak form as shown in Fig. 6 has been proposed. The optical fiber having a refractive index profile of a single-peak form is formed by covering the circumference of center core 1 with a refractive index greater than that of the silica level with outer cladding 5. The optical fiber of the proposed example is formed so that the refractive index of the outer cladding 5 is smaller than that of the silica glass.

45 [0009] However, the dispersion value of the optical fiber having a refractive index profile of a single-peak form in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  is approximately  $-80\text{ps/nm/km}$  at most as a limit value in practical use, and therefore, an optical fiber having a smaller dispersion value (absolute value of negative dispersion is great) cannot be realized by means of a refractive index profile of a single-peak form. Therefore, in order to compensate for the positive dispersion of the single-mode optical fiber by an optical fiber with a refractive index profile of a single-peak form, the length required

for the optical fiber for dispersion compensation increases, so that it is difficult to reduce the size of an optical fiber for dispersion compensation in which the abovementioned optical fiber is coiled and housed.

[0010] Furthermore, in the optical fiber with a refractive index profile of a single-peak form, the dispersion slope in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  is positive, so that it is difficult to compensate for the chromatic dispersion of the single mode optical fiber over a broadband of a  $1.55\mu\text{m}$  wavelength band.

[0011] Therefore, an optical fiber having a W-formed refractive index profile as shown in Fig. 7 has been proposed. The optical fiber having a W-formed refractive index profile is formed so that the circumference of center core 1 with a refractive index greater than that of the cladding level is covered by side core 12 having a refractive index smaller than that of the cladding level, and normally, the circumference of the side core 12 is covered by outer cladding 5 having a refractive index which is almost equal to that of the silica level.

[0012] In the optical fiber having the W-formed refractive index profile, the dispersion value in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  can be smaller (absolute value of negative dispersion can be made greater) than that of the optical fiber having a refractive index profile of a single-peak form, whereby an optical fiber whose dispersion value at the wavelength of  $1.55\mu\text{m}$  is approximately  $-120\text{ps/nm/km}$  has become practicable. Furthermore, in the optical fiber having the W-formed refractive index profile, the dispersion slope in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  can be made negative, whereby the positive dispersion slope of the single-mode optical fiber can be compensated to a degree for practical use, so that dispersion over a broadband of a  $1.55\mu\text{m}$  wavelength can be compensated more than in the case of the optical fiber having a refractive index profile of a single-peak form.

[0013] Moreover, for example, in Japanese Laid-Open Patent Publication No. 313750 of 1996, a method is proposed in which an optical fiber having a W-formed refractive index profile whose detailed structure is properly determined is used to compensate for the chromatic dispersion and dispersion slope in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  of the single-mode optical fiber, whereby the chromatic dispersion and dispersion slope in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  are compensated to be almost zero. In addition, a report was presented in Electro-society Convention C-172 1996 by the Electronic Information Transmission Society, stating that chromatic dispersion in a wavelength band of 1500 to 1600nm was suppressed to be  $-1$  to  $\text{Ops/nm/km}$  by compensating the dispersion of the single-mode optical fiber by using an optical fiber having a W-formed refractive index profile.

[0014] However, the optical fiber having the W-formed refractive index profile is difficult to form so that a negative dispersion slope is provided which can completely compensate for the positive dispersion slope of an optical fiber to be compensated at the wavelength of  $1.55\mu\text{m}$  being the central wavelength of the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$ , and dispersion is less than  $-120\text{ps/nm/km}$ .

[0015] Therefore, also in the case of using the optical fiber having the W-formed profile, the length of optical fiber required for compensation of dispersion of the single-mode optical fiber increases, so that it is difficult to reduce the size of an optical fiber module which is formed by coiling and housing said optical fiber in a case.

[0016] Furthermore, in both cases of the single-peak form and W-form of the prior-art optical fibers, the range of light transmission (effective core sectional area) in the single-mode is small, the power density of the light transmitted inside the optical fiber is high, and in addition, as mentioned above, the length of the optical fiber used is long, so that the non-linear phenomenon is easily generated inside the optical fiber. If so, distortion in signal waveform occurs due to this non-linear phenomenon, whereby transmissions cannot be correctly carried out, and therefore, the use of the dispersion compensating device using the optical fibers is inevitably limited.

[0017] Moreover, it also can be considered that deterioration of transmission signals due to chromatic dispersion is prevented by using the optical fiber for compensating dispersion of a dispersion shifted optical fiber having minute dispersion, however, it is considered difficult to completely compensate for the dispersion and dispersion slope of a dispersion shifted optical fiber having minute dispersion by the optical fiber having a single-peak or W-formed refractive index profile.

[0018] The invention is made in order to solve the abovementioned problems, and a first object thereof is to provide an optical fiber which is short and can compensate for positive dispersion of a single-mode optical fiber having a zero dispersion wavelength at the side of a wavelength shorter than the wavelength band in use at a broadband of the wavelength band in use, and an optical fiber whose effective core sectional area is large, and which can reduce distortion in signal waveforms due to the non-linear phenomenon. A second object is to provide an optical transmission line, in which distortion in signal waveforms due to dispersion over a broadband of a wavelength band in use and distortion in signal waveforms due to the non-linear phenomenon are less, and which is suitable for wavelength multiplexed transmissions.

#### Disclosure of Invention

[0019] In order to achieve the above objects, the above problems are solved by the following constructions of the invention. That is, a first construction of the optical fiber of the invention is characterized in that, the optical fiber is formed so that the outer circumferential side of the center core is covered by a first side core, the outer circumferential

side of said first side core is covered by a second side core, and the outer circumferential side of said second side core is covered by an outer cladding, wherein, when the maximum refractive index of the center core is  $n_1$ , the minimum refractive index of the first side core is  $n_2$ , the maximum refractive index of the second side core is  $n_3$ , and the refractive index of the outer cladding is  $n_c$ ,  $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ , and when the relative index difference of the center core from the outer cladding is  $\Delta_1$ , the relative index difference of the first side core from the outer cladding is  $\Delta_2$ , and the relative index difference of the second side core from the outer cladding is  $\Delta_3$ ,  $1.7\% \leq \Delta_1$ ,  $\Delta_2 \leq -0.3\%$ , and  $0.25\% \leq \Delta_3$ , and furthermore, a value A determined by dividing the diameter  $a_1$  of the center core by the diameter  $a_2$  of the first side core is  $0.15 \leq A \leq 0.5$ , and a value B determined by dividing the diameter  $a_3$  of the second side core by the diameter  $a_2$  of the first side core is  $1 < B \leq 2$ .

**[0020]** Preferably, the second side core has one or more extremely-large refractive index portions, and of the one or more extremely-large refractive index portions, maximum refractive index points are positioned at the side of the first side core from the center of the width in the direction of the diameter of the second side core.

**[0021]** More preferably, the outer circumferential side of the second side core is covered by an inner cladding, the outer circumferential side of said inner cladding is covered by the outer cladding, and the refractive index of the inner cladding is set to be smaller than that of the outer cladding.

**[0022]** In addition, chromatic dispersion in the wavelength band in use is set to be less than  $-120\text{ps/nm/km}$ .

**[0023]** Furthermore, a D/S value determined by dividing the chromatic dispersion D in a wavelength band in use by the chromatic dispersion slope S is set to be 0 to 500nm, more preferably, 0 to 300nm.

**[0024]** It is extremely preferable that the wavelength band in use of the optical fiber of the invention is set to be a wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$ .

**[0025]** Moreover, a first construction of the optical transmission line of the invention is characterized in that the dispersion slope in the wavelength band in use is reduced to be almost zero by connecting the optical fiber of the invention to a single-mode optical fiber having zero dispersion in a wavelength band at the side of a wavelength shorter than the wavelength band in use.

**[0026]** Furthermore, a second construction of the optical transmission line of the invention is characterized in that the optical fiber of the abovementioned construction of the invention and an optical fiber whose D/S value determined by dividing chromatic dispersion D in the wavelength band in use by the chromatic dispersion slope S is larger than 300nm or an optical fiber whose D/S value is negative are connected to a single-mode optical fiber having zero dispersion in a wavelength band at the side of a wavelength shorter than the wavelength band in use.

**[0027]** The present inventor noticed that the absolute value of negative dispersion per unit length in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  could be made to be relatively large if the refractive index profile of an optical fiber was formed as a W-formed refractive index profile, and examined change in the absolute value of negative dispersion per unit length in the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  when the detailed structure of the W-shaped refractive index profile was changed. As a result, the inventor could confirm that the absolute value became larger when the core diameter including the center core and side core was reduced. However, in this case, it was proved that the light confinement effect into the center core with a high refractive index became weaker, and the light transmission conditions were not satisfied, so that light was not transmitted, or although light was transmitted, the macrobend loss increased extremely, and therefore, it became impossible to coil the optical fiber to form a dispersion compensated module.

**[0028]** Therefore, a method was established in that, at the outer circumference of the side core in the W-formed refractive index profile, a segment core having a refractive index higher than that of the side core was provided, and light which leaked from the center core of the W-formed refractive index profile and could not be transmitted was confined (not allowed to escape to the cladding side) by the segment core with a high refractive index, whereby the light was transmitted and the abovementioned macrobend loss was reduced. In addition, it was proved that, by this method, light was transmitted while spreading toward portions other than the center portion of the center core, whereby the effective core sectional area substantially became larger, and the power density of the light to be transmitted was reduced.

**[0029]** Based on the abovementioned examination, in the optical fiber of the invention, side core 12 in the W-formed refractive index profile is referred to as a first side core, the segment core is referred to as a second side core, and the relationship between the maximum refractive index  $n_1$  of the center core, the minimum refractive index  $n_2$  of the first side core, the maximum refractive index  $n_3$  of the second side core, and the refractive index  $n_c$  of the outer cladding is set to  $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ . In addition, the value A determined by dividing the diameter  $a_1$  of the center core by the diameter  $a_2$  of the first side core is set to  $0.15 \leq A \leq 0.5$ , the value B determined by dividing the diameter  $a_3$  of the second side core by the diameter  $a_2$  of the first side core is set to  $1 < B \leq 2$ , whereby enlargement of the effective core sectional area is made possible.

**[0030]** Furthermore, by concretely determining the relative index difference  $\Delta_1$  of the center core from the outer cladding, the relative index difference  $\Delta_2$  of the first side core from the outer cladding, and the relative index difference  $\Delta_3$  of the second side core from the outer cladding to be  $1.7\% \leq \Delta_1$ ,  $\Delta_2 \leq -0.3\%$ , and  $0.25\% \leq \Delta_3$ , respectively, the dispersion value per unit length of the optical fiber can be made as small as, for example, less than  $-120\text{ps/nm/km}$  (the

absolute value of negative dispersion can be made larger), and the absolute value of the negative dispersion slope can be made larger.

[0031] By optimizing the refractive index profile based on the abovementioned examination by the present inventor, in the optical fiber of the invention, since the absolute value of negative dispersion per unit length in the wavelength band in use and the absolute value of the negative dispersion slope are made large, the optical fiber can be formed so that the positive dispersion of a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber can be compensated over a broadband of a wavelength band of 1.55 $\mu$ m, for example, or distortion due to the non-linear phenomenon can be reduced by enlarging the effective core sectional area.

[0032] In addition, according to the optical fiber arranged so that the second side core is provided with one or more extremely-large refractive index portions, in comparison with an optical fiber in which the second side core is flat in refractive index profile and has no extremely-large refractive index portions, the absolute value of negative dispersion and the absolute value of dispersion slope can be made large.

[0033] Furthermore, according to the optical fiber arranged so that the maximum refractive index points of one or more extremely-large refractive index portions of the second side core are at the side of the first side core from the center part in the diameter direction of the second side core, an optical fiber is more securely realized in which, while the effective cut-off wavelength is maintained at the short wavelength side, the absolute value of negative dispersion and the absolute value of the negative dispersion slope are made large.

[0034] Furthermore, according to an optical fiber arranged so that the outer circumferential side of the second side core is covered by an inner cladding, the outer circumferential side of said inner cladding is covered by an outer cladding, and the refractive index of the inner cladding is set to be smaller than that of the outer cladding, and by providing the inner cladding, light of an LP<sub>11</sub> mode having electric field distribution over a wide range in the direction of the core diameter is made to easily leak to shorten the effective cut-off wavelength, whereby an optical fiber can be more securely realized in which the absolute value of negative dispersion and the absolute value of the negative dispersion slope are large while an operation in the single-mode can be performed without fail.

[0035] Furthermore, according to the optical fiber arranged so that chromatic dispersion in the wavelength band in use is set to be less than -120ps/nm/km, the absolute value of the negative chromatic dispersion in the wavelength band in use is thus made large, whereby positive dispersion of a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber can be compensated by the short optical fiber.

[0036] Furthermore, according to the optical fiber, the D/S value of which is determined by dividing chromatic dispersion D in the wavelength band in use by the chromatic dispersion slope S is set to 0 to 500nm, positive dispersion of an optical fiber such as a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber can be compensated by the short optical fiber. Particularly, according to an optical fiber whose D/S value is set to 0 to 300nm, the positive dispersion and positive dispersion slope of a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber can be compensated by the optical fiber with a shorter length.

[0037] Furthermore, according to the optical fiber whose wavelength band in use is set to a wavelength band of 1.55 $\mu$ m, by applying this optical fiber for wavelength multiplexed optical transmissions using an optical amplifier equipped with an erbium doped optical fiber, the positive dispersion and positive dispersion slope of a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber can be compensated by the short optical fiber.

[0038] Furthermore, according to the optical transmission line of the invention, by using the abovementioned optical fiber, the dispersion and dispersion slope over a broadband of the wavelength band in use can be reduced to be almost zero, so that an optical transmission line suitable for wavelength multiplexed transmissions in which distortion due to dispersion is less can be obtained, and in particular, according to the optical transmission line arranged so that the dispersion slope and dispersion value in the wavelength band in use are reduced to be almost zero, by reducing both dispersion and dispersion slope to be almost zero, an optical transmission line extremely suitable for wavelength multiplexed transmissions in which distortion due to dispersion is almost zero.

#### Brief Description of the Drawings

[0039] Fig. 1 is a constructional diagram showing the refractive index profile of the first embodiment of the optical fiber relating to the invention, Fig. 2 is a constructional diagram showing the refractive index profile of the second embodiment of the optical fiber relating to the invention, Fig. 3 is a graph showing an example of properties of the optical transmission line formed by connecting the optical fiber of the first embodiment to a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber, Fig. 4 is a graph showing an example of properties of the optical transmission line formed by connecting two types of optical fibers having properties different from each other of the first embodiment to a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber, Fig. 5 are explanatory diagrams showing refractive index profiles from the optical fiber center to the middle portion of the cladding by means of a concrete example (a) of the optical fiber of the first embodiment and a comparative example (b), Fig. 6 is an explanatory diagram showing the refractive index profile of the optical fiber of the single-peak form, and fig. 7 is an explanatory diagram showing the refractive index



profile of the optical fiber of the W-form.

#### Best Mode for Carrying Out the Invention

[0040] The invention shall be described in more detail with reference to the attached drawings showing the embodiments. In the description below of each embodiment, components that are the same as in the prior-art example have the same symbols attached, and overlapping description thereof is omitted or simplified.

[0041] Fig. 1 shows the refractive index profile of the first embodiment of the optical fiber relating to the invention. As shown in the same figure, the optical fiber of the present embodiment is formed so that the outer circumferential side of the center core 1 is covered by the first side core 2, the outer circumferential side of the first side core 2 is covered by the second side core 3, and the outer circumferential side of the second side core 3 is covered by outer cladding 5. The outer cladding 5 is formed from silica, the center core 1 and second side core 3 are formed so as to have refractive indexes higher than that of silica, and the first side core 2 is formed so as to have a refractive index lower than that of silica. The relationship between refractive index (maximum refractive index)  $n_1$  of the center core 1, the refractive index (minimum refractive index)  $n_2$  of the first side core 2, the refractive index (maximum refractive index)  $n_3$  of the second side core, and the refractive index  $n_c$  of outer cladding 5 is  $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ . These refractive indexes are values when the refractive index in vacua is 1.

[0042] Furthermore, when the relative index difference of the center core 1 from the cladding level (that is, the comparative refractive index difference of the center core 1 from the outer cladding 5) is  $\Delta_1$ , the relative index difference of the first side core 2 from the cladding level (that is, the relative index difference of the first side core 2 from the outer cladding 5) is  $\Delta_2$ , and the relative index difference of the second side core 3 from the cladding level (that is, the relative index difference of the second side core 3 from the outer cladding 5) is  $\Delta_3$ , the optical fiber is formed so that  $1.7\% \leq \Delta_1$ ,  $\Delta_2 \leq -0.3\%$ , and  $0.25\% \leq \Delta_3$ .

[0043] The respective relative index differences  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ , and  $\Delta_3$  are defined by the following formulas (1) through (3), and the formulas are in units of %.

$$\Delta_1 = \{[(n_1)^2 - (n_c)^2] / 2(n_c)^2\} \times 100 \quad (1)$$

$$\Delta_2 = \{[(n_2)^2 - (n_c)^2] / 2(n_c)^2\} \times 100 \quad (2)$$

$$\Delta_3 = \{[(n_3)^2 - (n_c)^2] / 2(n_c)^2\} \times 100 \quad (3)$$

[0044] Furthermore, in the present embodiment, the value A determined by dividing the diameter  $a_1$  of the center core by the diameter  $a_2$  of the first side core ( $A = a_1/a_2$ ) is  $0.15 \leq A \leq 0.5$ , and the value B determined by dividing the diameter  $a_3$  of the second side core by the diameter  $a_2$  of the first side core ( $B = a_3/a_2$ ) is  $1 < B \leq 2$ .

[0045] In order to realize the above refractive index profiles, in the present embodiment, the center core 1 and second side core 3 are formed from germanium-doped silica, and the first side core 2 is formed from fluorine-doped silica. In addition, the center core 1 and first side core 2 can be doped with germanium and fluorine, or the center core 1, first side core 2, and second side core 3 can be doped with germanium and fluorine.

[0046] When determining the refractive index profile of the optical fiber of the present embodiment as mentioned above, the present inventor confirmed that, if the core diameter including the center core and side core of the optical fiber of a W-formed refractive index profile was made smaller, for example, the absolute value of negative dispersion at a wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$  which is the center wavelength of the wavelength band of 1.55  $\mu\text{m}$  became larger. Furthermore, in order to solve the problem due to the small core diameter, that is, in order to prevent insufficient transmission of light and an increase in macrobend loss which are caused by the light confinement effect into the center core becoming lower, it was determined that a second side core 3 with a refractive index higher than that of the first side core is provided at the outer circumference of the side core (first side core 2).

[0047] Then, as mentioned above, the relationship between the maximum refractive index  $n_1$  of the center core, the minimum refractive index  $n_2$  of the first side core, the maximum refractive index  $n_3$  of the second side core, and the refractive index  $n_c$  of the outer cladding was set to  $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ , and next, the concrete value of the relative index difference  $\Delta_1$  of the center core (the refractive index of the center core with respect to the refractive index of the outer cladding 5) was examined. As a result, it was proved that, in the case where  $\Delta_1$  was less than 1.7%, dispersion per unit length of the optical fiber in the wavelength band of 1.55  $\mu\text{m}$  could not be set to be less than -120 ps/nm/km (the absolute value of negative dispersion could not be set to be larger than 120), and the macrobend loss in this wavelength

band in the case of a 20mm diameter became larger than 0.5dB/m, so that the optical fiber thus arranged was not suitable for use in the coiled condition for compensation of dispersion. Therefore, in the present embodiment,  $1.7\% \leq \Delta 1$ .

**[0048]** Likewise, concrete values of  $\Delta 2$  and  $\Delta 3$  were examined, and it was proved that, when  $\Delta 2$  was more than -0.3% or  $\Delta 3$  was less than 0.25%, great negative dispersion or dispersion slope could not be obtained in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m, or the transmission loss due to bending and microbend easily increased. Therefore, in the present embodiment,  $\Delta 2 \leq -0.3\%$  and  $0.25\% \leq \Delta 3$ .

**[0049]** Furthermore, it was proved that, if the value A determined by dividing the diameter a1 of the center core 1 by the diameter a2 of the first side core was less than 0.15, the second side core 3 became too distant from the center core 1, so that the light confinement effect into the core by the second side core 3 could not be utilized. Concretely, if so, the dispersion value at a wavelength of 1.55 $\mu$ m became approximately -80ps/nm/km as in the case of the optical fiber having a refractive index profile formed of a single-peak. On the other hand, it was proved that, if the value A exceeded 0.5, the effect in that the absolute value of the negative dispersion and absolute value of the negative dispersion slope of the W-formed refractive index profile could be made large in accordance with a reduction in diameter could not be obtained. Therefore,  $0.15 \leq A \leq 0.5$ .

**[0050]** Furthermore, since it was also proved that, in the case where the value B determined by dividing the diameter a3 of the second side core 3 by the diameter a2 of the first side core 2 was more than 2, the light confinement effect into the core by the second side core 3 could not be utilized, and therefore,  $1 < B \leq 2$ .

**[0051]** According to the present embodiment, the ratio of refractive index profile and core diameter of the optical fiber are determined based on the above results of examination, for example, by setting the dispersion value at a wavelength of 1.55 $\mu$ m which is the central wavelength of a wavelength band of 1.55 $\mu$ m to be less than -120ps/nm/km, the absolute value of negative dispersion can be made larger and the absolute value of the negative dispersion slope in a wavelength band of 1.55 $\mu$ m can be made larger. Accordingly, by the optical fiber of the present embodiment which has a short length, the positive chromatic dispersion and positive dispersion slope of the single-mode optical fiber can be effectively compensated.

**[0052]** In addition, according to the present embodiment, the macrobend loss in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m can be reduced, so that an optical fiber which is extremely suitable for use by being coiled can be obtained.

**[0053]** Furthermore, since the refractive index profile of the present embodiment has a construction in that a core layer with a refractive index higher than that of side core layer 12 is provided at the outer circumference of the side core layer 12 whose refractive index is low in the W-formed refractive index profile shown in Fig. 7, the core layer (second side core 3) outside the core layer (first side core 2) with the low refractive index confines light that is in a condition where it has leaked from the center core of the W-formed refractive index profile and cannot be transmitted (that is, prevents light leakage toward the cladding side), whereby the light is transmitted while widely spreading to the portion other than the center of the center core 1, and therefore, the effective core sectional area is substantially increased to reduce the power density of the light to be transmitted. In the present embodiment, if the absolute value of  $\Delta 3$  is set to be larger than that of  $\Delta 2$ , that is, if  $|\Delta 3| > |\Delta 2|$ , other properties when the absolute value of the negative dispersion and the absolute value of the negative dispersion slope are made large are improved. This is preferable.

#### (Concrete Examples)

**[0054]** Hereinafter, concrete examples in which the embodiments take shape shall be described. Properties of the optical fiber are shown in Table 1 as concrete examples 1 through 6 of the first embodiment when the relative index difference  $\Delta 1$  of the center core 1, relative index difference  $\Delta 2$  of the first side core 2, relative index difference  $\Delta 3$  of the second side core 3, diameter a1 of the center core 1, diameter a2 of the first side core 2, and diameter a3 of the second side core 3 are variously changed within the abovementioned range. Units are shown in parentheses in the table.

**[0055]** Herein, chromatic dispersion in Table 1 is shown as a value of chromatic dispersion at a wavelength of 1.55 $\mu$ m, and the dispersion slope at a wavelength of 1.55 $\mu$ m is shown. D/S is the D/S value determined by dividing the dispersion value D at the wavelength of 1.55 $\mu$ m by the dispersion slope S. In this specification, the D/S value, that is, the value determined by dividing the chromatic dispersion D in the wavelength band in use by the chromatic dispersion slope S shows the value determined by dividing the chromatic dispersion D at each wavelength in the wavelength band in use by the chromatic dispersion slope S at said wavelength, and its representative value is the value determined by dividing the dispersion value D at the wavelength of 1.55 $\mu$ m by the dispersion slope S at the wavelength of 1.55 $\mu$ m shown in Table 1.

(Table 1)

	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	$\Delta 3$ (%)	a1 ( $\mu\text{m}$ )	a2 ( $\mu\text{m}$ )	a3 ( $\mu\text{m}$ )	Chromatic dispersion (ps/km/nm)	Dispersion slope (ps/km/nm <sup>2</sup> )	D/S (nm)
Concrete Example 1	2.3	-0.45	0.6	3	9.6	12	-187	-0.554	338
Concrete Example 2	2	-0.45	0.8	3.13	10	12.5	-150	-1.410	106
Concrete Example 3	2.8	-0.55	0.8	2.5	8	10	-265	-0.463	573
Concrete Example 4	2.74	-0.56	0.75	2.64	9.4	11.75	-167	-1.017	165
Concrete Example 5	2.76	-0.54	0.82	2.53	8.7	11.43	-215	-0.706	305
Concrete Example 6	1.7	-0.3	0.5	3.375	12	15	-96	-0.637	151

[0056] Furthermore, in Table 2, as comparative examples, the structure and properties of an optical fiber (comparative example 1) having the single-peak refractive index profile (see Fig. 6) of a matched cladding type and the structure and properties of an optical fiber (comparative example 2) of the W-formed refractive index profile (see Fig. 7) are shown. In comparative example 1 in this table,  $\Delta 1$  shows the relative index difference of the center core 1 from the silica level,  $\Delta 2$  shows the relative index difference of the outer cladding 5 from the silica level, a1 is the diameter of the center core 1, and a2 is the diameter of the outer cladding 5, and in comparative example 2,  $\Delta 1$  shows the relative index difference of the center core 1 from the silica level,  $\Delta 2$  is the relative index difference of the side core 12 from the silica level, a1 is the diameter of the center core 1, and a2 is the diameter of the side core 12. Chromatic dispersion, dispersion slope, and D/S are determined in the same manner as in Table 1, and Aeff of Table 2 shows the effective core sectional area in the wavelength band of 1.55 $\mu\text{m}$ .

(Table 2)

	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	a1 ( $\mu\text{m}$ )	a2 ( $\mu\text{m}$ )	Chromatic dispersion (ps/km/nm)	Dispersion slope	D/S (nm)	Aeff ( $\mu\text{m}^2$ )
Comparative Example 1	2.8	-0.4	2.5	125	-78	0.053	-1472	12.1
Comparative Example 2	2.0	-0.56	2.6	8.4	-105	-0.345	304	14.8

[0057] On supposition that refractive index in vacuum is 1, when the refractive index of silica is ns, the refractive index of the center core 1 is n1, the refractive index of the cladding 5 in comparative example 1, and the refractive index of the side core 12 is n2 in comparative example 2, the relative index differences  $\Delta 1$  and  $\Delta 2$  in Table 2 are defined by the following formulas (4) and (5), and they are in units of %.

$$\Delta 1 = \{[(n1)^2 - (ns)^2] / 2(ns)^2\} \times 100 \quad (4)$$

$$\Delta 2 = \{[(n_2)^2 - (n_s)^2] / 2(n_s)^2\} \times 100 \quad (5)$$

[0058] As shown in Table 1, in all optical fibers of concrete examples 1 through 5, the chromatic dispersion at a wavelength of 1.55 $\mu$ m is less than -120ps/nm/km, the dispersion slope in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m takes a negative value, and the absolute value of the dispersion slope is more than that of comparative examples 1 and 2. In addition, in the optical fiber of concrete example 6, chromatic dispersion at the wavelength of 1.55 $\mu$ m take a value more than -120ps/nm/km, however, the absolute value of the negative dispersion slope in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m is large.

[0059] Thus, the optical fibers of the present embodiment shown by concrete examples 1 through 6 can be formed so that one or both of the absolute value of the negative dispersion at the wavelength of 1.55 $\mu$ m and the absolute value of the negative dispersion slope in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m are large in comparison with comparative examples 1 and 2.

[0060] In concrete examples 2, 4, and 6, the D/S values are as small as 0 to 300. If an optical fiber, whose dispersion and dispersion slope in the wavelength band in use are negative, and a D/S value as small as 0 to 300, is used, positive dispersion and positive dispersion slope in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m of a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber can be compensated by the abovementioned short optical fiber.

[0061] In addition, the D/S value being small and the absolute value of negative dispersion being large means that the absolute value of negative dispersion and the absolute value of the negative dispersion slope are large, so that the abovementioned effect can be obtained. The smaller the D/S value within the abovementioned range, the more the range of dispersion properties of a single-mode optical fiber being able to be compensated can be expanded and the range of the means for compensating the dispersion properties of the single-mode optical fiber can be expanded, however, for example, even when the D/S value is larger than the abovementioned range, if the D/S value is within a range of 0 to 500, the positive dispersion and positive dispersion slope in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m of a 1.3 $\mu$ m band zero dispersion single-mode optical fiber can be compensated by the short optical fiber.

[0062] As a concrete example of an optical fiber in which the dispersion and dispersion slope in a wavelength band of 1.55 $\mu$ m are negative, and the D/S value is small, the present inventor made an optical fiber in which chromatic dispersion at a wavelength of 1550nm was -135.7ps/nm/km, the dispersion slope in a wavelength band of 1.55 $\mu$ m was -0.513ps/nm<sup>2</sup>/km, and the D/S value was set to approximately 265, and connected this optical fiber to the abovementioned single-mode optical fiber to form an optical transmission line, and as a result, the chromatic dispersion properties in this optical transmission line became as shown by the solid line of Fig. 3. This optical transmission line was formed so that the ratio of the length of the single-mode optical fiber and the length of the optical fiber was set to be 9 to 1.

[0063] As is clearly understood from the same figure, it is proved that, if the optical fiber of the present embodiment is used, the dispersion slope in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m of the single mode optical fiber could be compensated by the short optical fiber, the dispersion slope could be reduced to be almost zero, and deflection due to the chromatic dispersion could be suppressed to be low.

[0064] Furthermore, as still another concrete examples of the present embodiment, an optical fiber A, in which chromatic dispersion at a wavelength of 1550nm was -171ps/nm/km, dispersion slope in a wavelength band of 1.55 $\mu$ m was -0.851ps/nm<sup>2</sup>/km, and the D/S value was set to approximately 200, and an optical fiber B, in which the chromatic dispersion at a wavelength of 1550nm was -196ps/nm/km, the dispersion slope at a wavelength of 1.55 $\mu$ m was -0.109ps/nm<sup>2</sup>/km, and the D/S value was set to approximately 1798, were manufactured. Then, these optical fibers A and B were connected to the single-mode optical fiber to form an optical transmission line. As a result, the chromatic dispersion properties of this optical transmission line became as shown by the solid line of Fig. 4.

[0065] This optical transmission line was formed by connecting the single-mode optical fiber having a length of 16km, the optical fiber A having a length of 1km, and the optical fiber B having a length of 0.555km. As is clearly understood from the same figure, if the optical fiber of the present embodiment is used, the chromatic dispersion and dispersion slope in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m of the single-mode optical fiber can be compensated by the optical fibers with short lengths, the dispersion slope can be reduced to be almost zero (the absolute value of the dispersion slope can be made to be  $\pm 0.01$  or less), and the dispersion value can also be reduced to be almost zero.

[0066] If the single-mode optical fiber having a length of 16km is compensated by only the optical fiber of the W-formed refractive index profile shown in Fig. 7, a length of 2.7km becomes necessary for the optical fiber. Therefore, by using the optical fiber of the present embodiment, the required length of the optical fiber can be shortened by 40%, whereby reduction in size of a dispersion compensating device using the optical fiber and reduction in non-linear phenomenon occurring inside the optical fiber can be realized.

[0067] In Table 3, as still further examples of the present embodiment, examples (concrete examples 7 and 8) of the optical fiber in which the effective core sectional area  $A_{eff}$  in the wavelength band of 1.55 $\mu$ m is enlarged are shown. In Table 3, relative index differences  $\Delta 1$  through  $\Delta 3$  are determined by the abovementioned formulas (1) through (3).

In addition, values of chromatic dispersion, dispersion slope, D/S, and Aeff are determined in the same manner as in Tables 1 and 2.

(Table 3)

	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	$\Delta 3$ (%)	a1 ( $\mu\text{m}$ )	a2 ( $\mu\text{m}$ )	a3 ( $\mu\text{m}$ )	Chromatic dispersion (ps/km/nm)	Aeff ( $\mu\text{m}^2$ )
Concrete Example 7	2.8	-0.55	0.96	2.2	7.3	10.2	-90	115
Concrete Example 8	2.3	-0.45	0.75	2.6	8.4	10.5	-110	82

**[0068]** According to these concrete examples, in comparison with the abovementioned comparative examples 1 and 2, the effective core sectional area in the wavelength band of 1.55 $\mu\text{m}$  can be significantly enlarged, whereby distortion due to the non-linear phenomenon can be reduced.

**[0069]** In Table 4, as still further concrete examples of the present embodiment, properties of optical fibers of concrete examples 9a and 9b are shown, each of which is formed so that, as shown in Fig. 5(a), the second side core 3 is provided with an extremely-large refractive index portion, maximum refractive index point 3a of this extremely-large refractive index portion is positioned at the side of the first side core 2 from the center (C in the figure) of the width in the direction of the diameter of the second side core 3.

(Table 4)

	Peak position	Effective cut-off wavelength (nm)	Dispersion (ps/km/nm)	Dispersion slope (ps/km/nm <sup>2</sup> )	D/S (nm)
Concrete Example 9a	0.07	1529	-185.2	-1.186	156.2
Concrete Example 9b	0.31	1523	-214.1	-0.975	219.6
Comparative Example 3	0.51	1515	-288.4	0.412	-700.0
Comparative Example 4	0.96	1526	-140.3	1.916	-73.2
Comparative Example 5		1519	-3.3	0.152	-21.8

**[0070]** The chromatic dispersion shown in Table 4 is the chromatic dispersion value at a wavelength of 1.55 $\mu\text{m}$ , the dispersion slope is the dispersion slope at a wavelength of 1.55 $\mu\text{m}$ , and D/S is the D/S value determined by dividing the dispersion value D at the wavelength of 1.55 $\mu\text{m}$  by the dispersion slope S. The peak position shown in Table 4 shows the position of the maximum refractive index point 3a of the second cladding 3 as shown in Fig. 5(a) on the supposition that the position of the interface between the first side core 2 and second side core 3 is 0, and the position of the interface between the second side core 3 and outer cladding 5 is 1.

**[0071]** In addition, in Table 4, as comparative examples 3 and 4, properties of an optical fiber are shown in which the maximum refractive index point of the maximum refractive index point of the second side core 3 is positioned at the side of the outer cladding 5 from the center (C in the figure) of the width in the diameter direction of the second side core 3, and as comparative example 5, properties of an optical fiber with a flat distribution of the refractive index as shown in Fig. 5 (b) are shown, in which the second side core 3 is provided with no extremely-large refractive index portions.

**[0072]** As for the optical fibers shown in Table 4, although concrete refractive index profiles are not shown, all the profiles are determined so that the effective cut-off wavelength becomes less than 1550nm within the range of the refractive index profile determined in the first embodiment.

**[0073]** The present inventor found that, by setting the relative index differences  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$ , and  $\Delta 3$  and the parameters of the diameter a1 of the center core 1, diameter a2 of the first side core 2, and diameter a3 of the second side core 3 to be within the range specified in the first embodiment, the absolute value of negative dispersion and absolute value of the negative dispersion slope per unit length in the wavelength band in use of, for example, 1.55 $\mu\text{m}$  were set to be

large, and it becomes possible to compensate for the positive dispersion of the single-mode optical fiber over a broad-band of the wavelength band in use, the effective cut-off wavelength might be at the side of a wavelength longer than the wavelength band in use depending on the set values of the abovementioned parameters.

[0074] Therefore, the present inventor variously examined how to make single-mode operation possible by setting the effective cut-off wavelength to be at the side of a wavelength shorter than the wavelength band in use, and as shown in concrete examples 9a and 9b, found that the position of the maximum refractive index point 3a of the second side core 3 was set at the side of the first side core 2 from the center of the width in the diameter direction of the second side core, whereby the effective cut-off wavelength was moved to the shorter wavelength side, and as mentioned above, the absolute value of the negative dispersion and the absolute value of the negative dispersion slope per unit length in the wavelength band in use, for example, the wavelength band of 1.55 $\mu$ m could be made large.

[0075] The inventor considers the reason for this to be as follows. That is, among the propagation modes of the optical fiber, the LP<sub>0m</sub> (m=2, 3...) or LP<sub>11</sub> mode has electric field distribution in a wide range in the direction of the optical fiber diameter, so that, by setting the maximum refractive index point of the second side core 3 at the side of the first side core 2 from the center of the width in the diameter direction of the second side core 3, while influences of light transmitted through the optical fiber onto the LP<sub>01</sub> mode are suppressed, light is prevented from propagating in the LP<sub>0m</sub> mode and LP<sub>11</sub> mode, whereby single mode operation becomes possible.

[0076] Concrete examples 9a and 9b determine the component parameters based on this consideration, and therefore, concrete examples 9a and 9b can show the abovementioned excellent effect as shown in Table 4.

[0077] Additionally describing the results shown in Table 4, in comparative examples 3 and 4, upon setting the position of the maximum refractive index point 3a of the second side core 3 as shown in Table 4, the refractive index profile is determined so that effective cut-off wavelength becomes less than 1550nm, whereby the dispersion slope becomes a positive value as shown in Table 4, and in addition, in comparative example 4, the absolute value of the dispersion value also becomes smaller. Furthermore, in comparative example 5, in accordance with the refractive index profile shown in Fig. 5(b), the refractive index profile is determined so that the effective cut-off wavelength becomes 1550nm, whereby the dispersion slope becomes a positive value in the same manner as mentioned above, and the absolute value of the dispersion value becomes extremely small.

[0078] On the other hand, concrete examples 9a and 9b show the abovementioned excellent effect, wherein, by properly setting the position of the maximum refractive index point 3a of the second side core 3 at the side of the first side core 2 from the center of the width in the diameter direction of the second side core 3, desired properties can be obtained.

[0079] Next, the second embodiment of the optical fiber relating to the invention shall be described. In Fig. 2, the refractive index profile of the second embodiment is shown. The second embodiment is constructed in almost the same manner as in the first embodiment, and the characteristic points of difference of the second embodiment from the first embodiment are in that the outer circumferential side of the second side core 3 is covered by the inner cladding 4, the outer circumferential side of the inner cladding 4 is covered by the outer cladding 5, and the refractive index of the inner cladding 4 is set to be smaller than the refractive index n<sub>c</sub> of the outer cladding 5.

[0080] The refractive index of the inner cladding 4 is n<sub>4</sub>, and on the supposition that the relative index difference of the inner cladding 4 from the outer cladding 5 is  $\Delta 4$ ,  $\Delta 4 > \Delta 2$ .  $\Delta 4$  is defined by the following formula (6).

$$\Delta 4 = \{[(n_4)^2 - (n_c)^2] / 2(n_c)^2\} \times 100 \quad (6)$$

[0081] The second embodiment is thus arranged, and is characterized in that, by providing the inner cladding 4 with a low refractive index at the outer circumferential side of the second side core 3, light of an LP<sub>11</sub> mode having electric field distribution in a wide range in the direction of the core diameter is made to easily leak to shorten the effective cut-off wavelength.

in the case where the second side core 3 with a high refractive index is provided at the circumference of the first side core 2 as in the invention, high negative dispersion and high negative slope are realized, however, depending on the refractive index profile of the optical fiber, the effective cut-off wavelength may become longer. If so, the optical fiber cannot carry out single-mode operation, so that, in order to securely prevent the effective cut-off wavelength from lengthening, the inner cladding 4 with a low refractive index is provided at the outer circumferential side of the second side core 3 as mentioned above, whereby the effective cut-off wavelength is made shorter, and the refractive index profile is determined so that the optical fiber can easily carry out single-mode operation.

(Concrete example)

[0082] In Table 5, as a concrete example of the second embodiment, the construction and properties of an optical

## EP 1 107 028 A1

fiber of concrete example 11 are shown together with concrete example 10 of the optical fiber of the abovementioned first embodiment. In addition, the relative index differences  $\Delta 1$  through  $\Delta 3$  are determined by the abovementioned formulas (1) through (3). The values of chromatic dispersion, dispersion slope, D/S, and Aeff are determined in the same manner as in Tables 1 and 2.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

(Table 5)

	$\Delta 1$ (%)	$\Delta 2$ (%)	$\Delta 3$ (%)	$\Delta 4$ (%)	a1 ( $\mu\text{m}$ )	a2 ( $\mu\text{m}$ )	a3 ( $\mu\text{m}$ )	a4 ( $\mu\text{m}$ )	Chromatic dispersion (ps/km/nm)	Dispersion slope (ps/km/nm <sup>2</sup> )	D/S (nm)	Aeff ( $\mu\text{m}^2$ )	Effective cut-off wavelength (nm)
Concrete Example 10	2.83	-0.59	0.72	—	2.86	10.2	12.7	—	-200	-1.185	168	16	1621
Concrete Example 11	2.83	-0.59	0.72	-0.08	2.85	10.1	12.7	19	-203	-1.037	195	18	1468



[0083] As is clearly understood from this Table 5, by providing the inner cladding 4, the effective cut-off wavelength can be made shorter, and furthermore, the  $A_{eff}$  can be made larger. In addition, in the case where the inner cladding 4 with a low refractive index is provided at the outer circumferential side of the second side core 3, it is not always necessary that the maximum refractive index point 3a of the second side core 3 be set at the side of the first side core 2 from the center C of the width in the diameter direction of the second side core 3, however, in order to increase the diameter of the  $A_{eff}$ , it is desirable that the maximum refractive index point 3a of the second side core 3 is positioned at the side of the first side core 2 from the center C of the width in the diameter direction of the second side core 3.

[0084] The present invention is not limited to the abovementioned embodiments, but can employ various embodiments. For example, in the data shown in Fig. 4, the optical fiber of the invention whose D/S value is set to 0 to 300 and an optical fiber whose D/S value is more than 300 are connected to the single-mode optical fiber to form an optical transmission line, however, an optical transmission line can be formed by connecting the optical fiber of the invention whose D/S value is set to 0 to 300 and an optical fiber whose D/S value is negative to the single mode optical fiber, whereby, as shown in Fig. 4, the dispersion slope and dispersion value in the wavelength band in use can be reduced to be almost zero. Furthermore, only the dispersion slope in the wavelength band in use can be reduced to be almost zero. Moreover, any single mode optical fiber to be connected to the optical fiber of the invention can be used as long as it has a zero dispersion wavelength at the side of a wavelength shorter than the wavelength band in use, for example, a dispersion shifted optical fiber having minute dispersion in the wavelength band in use can be used.

[0085] As shown in Fig. 1, Fig. 2, and Fig. 5, in the abovementioned embodiments, the second side core 3 has one extremely-large refractive index portion, however, the number of extremely-large refractive index portions can be 2 or more. In this case as well, the maximum refractive index points of the plurality of extremely-large refractive index portions are positioned at the side of the first side core 2 from the center of the width in the diameter direction of the second side core 3, whereby the optical fiber as shown in Fig. 9a or 9b in which the absolute value of the negative dispersion and absolute value of negative dispersion slope are set to be large while the effective cut-off wavelength is at the side of a short wavelength can be realized.

#### Industrial Applicability

[0086] As described above, the optical fiber of the invention is suitable for compensating the positive dispersion and positive dispersion slope of light signals at the wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$  to be transmitted through a single-mode optical fiber having zero dispersion in a wavelength band of, for example,  $1.3\mu\text{m}$  at the side of a wavelength shorter than the wavelength band in use by means of a short length. In addition, the optical transmission line relating to the invention makes zero dispersion at the receiver side possible for wavelength multiplexed light having various wavelengths (in particular, light in a wavelength band of  $1.55\mu\text{m}$ ), and suppresses the non-linear phenomenon, and therefore, is suitable as an optical transmission line for high quality, high-rate and large-capacity wavelength multiplex transmissions.

#### Claims

1. An optical fiber formed so that the outer circumferential side of a center core is covered by a first side core, the outer circumferential side of said first side core is covered by a second side core, and the outer circumferential side of said second side core is covered by an outer cladding, wherein, when the maximum refractive index of the center core is  $n_1$ , the minimum refractive index of the first side core is  $n_2$ , the maximum refractive index of the second side core is  $n_3$ , and the refractive index of the outer cladding is  $n_c$ ,  $n_1 > n_3 > n_c > n_2$ , when the relative index difference of the center core from the outer cladding is  $\Delta_1$ , the relative index difference of the first side core from the outer cladding is  $\Delta_2$ , and the relative index difference of the second side core from the outer cladding is  $\Delta_3$ ,  $1.7\% \leq \Delta_1$ ,  $\Delta_2 \leq -0.3\%$ , and  $0.25\% \leq \Delta_3$ , the value A, determined by dividing the diameter  $a_1$  of the center core by the diameter  $a_2$  of the first side core, is  $0.15 \leq A \leq 0.5$ , and the value B, determined by dividing the diameter  $a_3$  of the second side core by the diameter  $a_2$  of the first side core, is  $1 < B \leq 2$ .
2. An optical fiber as set forth in Claim 1, wherein the second side core has one or more extremely-large refractive index portions, and the maximum refractive index points of the extremely-large refractive index portions are positioned at the side of the first side core from the center of the width in the diameter direction of the second side core.
3. An optical fiber as set forth in Claim 1, wherein the outer circumferential side of the second side core is covered by an inner cladding, the outer circumferential side of said inner cladding is covered by the outer cladding, and the refractive index of the inner cladding is set to be smaller than that of the outer cladding.

4. An optical fiber as set forth in Claim 2, wherein the outer circumferential side of the second side core is covered by an inner cladding, the outer circumferential side of said inner cladding is covered by the outer cladding, and the refractive index of the inner cladding is set to be smaller than that of the outer cladding.
5. An optical fiber as set forth in Claim 1, wherein chromatic dispersion in the wavelength band in use is set to be less than -120ps/nm/km.
6. An optical fiber as set forth in Claim 2, wherein chromatic dispersion in the wavelength band in use is set to be less than -120ps/nm/km.
7. An optical fiber as set forth in Claim 3, wherein chromatic dispersion in the wavelength band in use is set to be less than -120ps/nm/km.
8. An optical fiber as set forth in Claim 4, wherein chromatic dispersion in the wavelength band in use is set to be less than -120ps/nm/km.
9. An optical fiber as set forth in any one of Claims 1 through 8, wherein the D/S value determined by dividing the chromatic dispersion D in the wavelength band in use by the chromatic dispersion slope S is set to 0 to 500nm.
10. An optical fiber as set forth in any one of Claims 1 through 8, wherein the D/S value determined by dividing the chromatic dispersion D in the wavelength band in use by the chromatic dispersion slope S is set to 0 to 300nm.
11. An optical fiber as set forth in Claim 5, wherein the wavelength band in use is set to be a wavelength band of 1.55 $\mu$ m.
12. An optical fiber as set forth in Claim 6, wherein the wavelength band in use is set to be a wavelength band of 1.55 $\mu$ m.
13. An optical fiber as set forth in Claim 7, wherein the wavelength band in use is set to be a wavelength band of 1.55 $\mu$ m.
14. An optical fiber as set forth in Claim 8, wherein the wavelength band in use is set to be a wavelength band of 1.55 $\mu$ m.
15. An optical fiber as set forth in Claim 9, wherein the wavelength band in use is set to be a wavelength band of 1.55 $\mu$ m.
16. An optical fiber as set forth in Claim 10, wherein the wavelength band in use is set to be a wavelength band of 1.55 $\mu$ m.
17. An optical transmission line, wherein the optical fiber as set forth in any one of Claims 1 through 16 is connected to a single-mode optical fiber having zero dispersion in a wavelength band at the side of a wavelength shorter than the wavelength band in use, whereby the dispersion slope in the wavelength band in use is made almost zero.
18. An optical transmission line, wherein the optical fiber as set forth in any one of Claims 1 through 16 and an optical fiber whose D/S value determined by dividing the chromatic dispersion D by the chromatic dispersion slope S is more than 300nm or an optical fiber whose D/S value is negative are connected to a single-mode optical fiber having zero dispersion in a wavelength band at the side of a wavelength shorter than the wavelength band in use, whereby the dispersion slope and dispersion value in the wavelength band in use are made almost zero.

Fig. 1

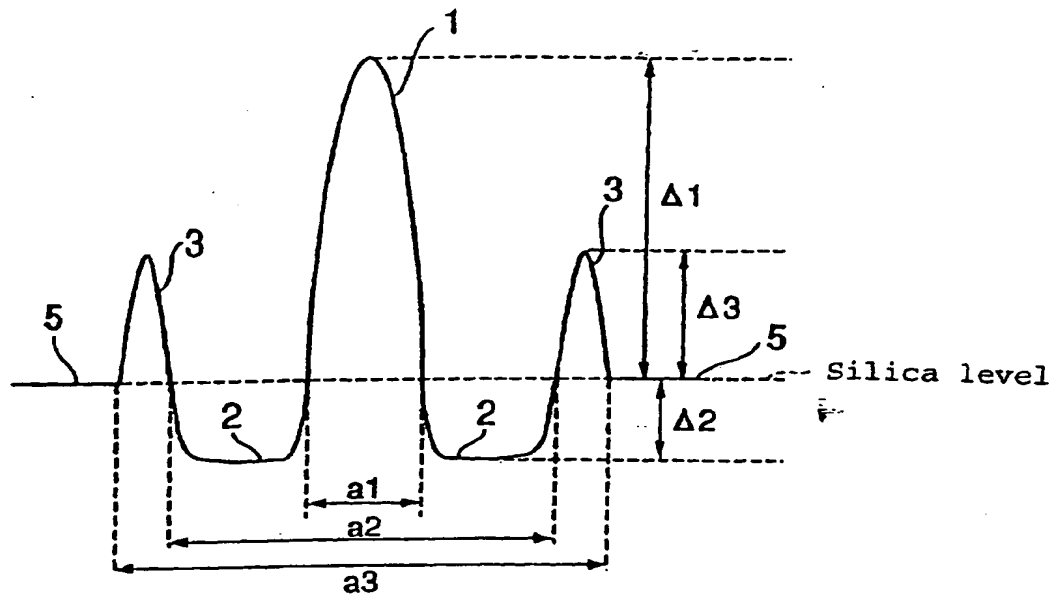


Fig. 2

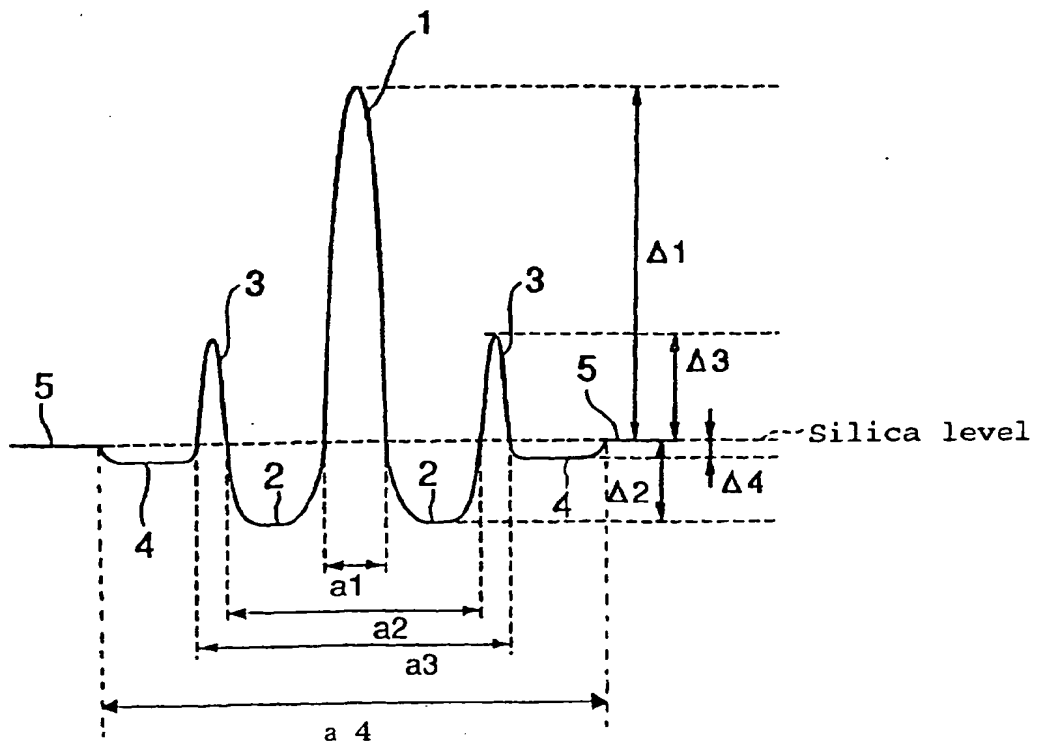


Fig. 3

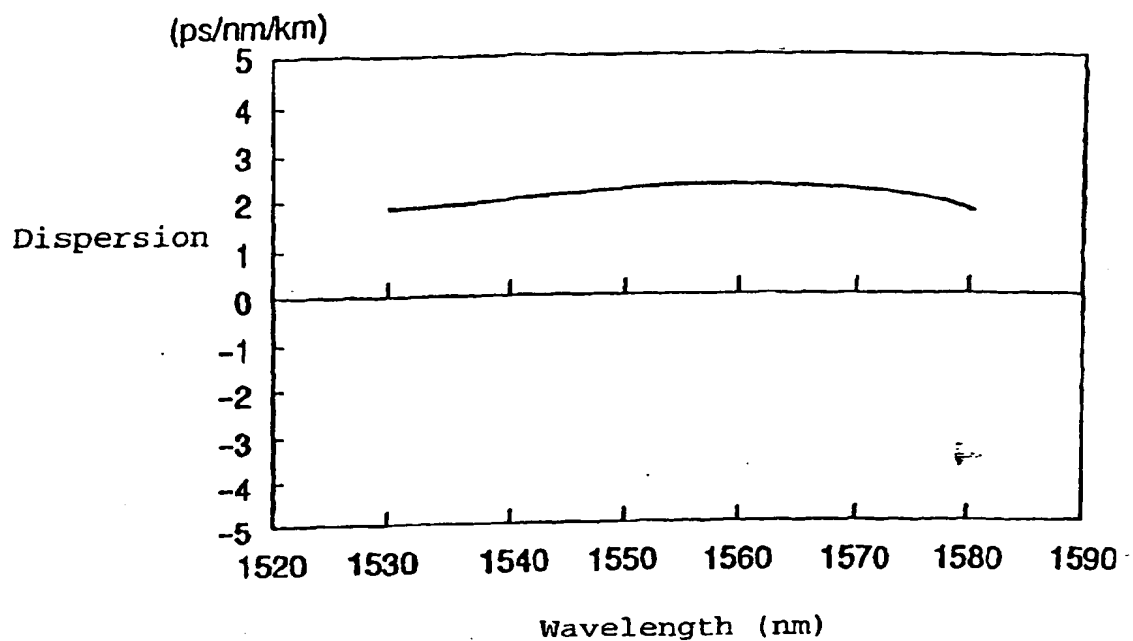


Fig. 4

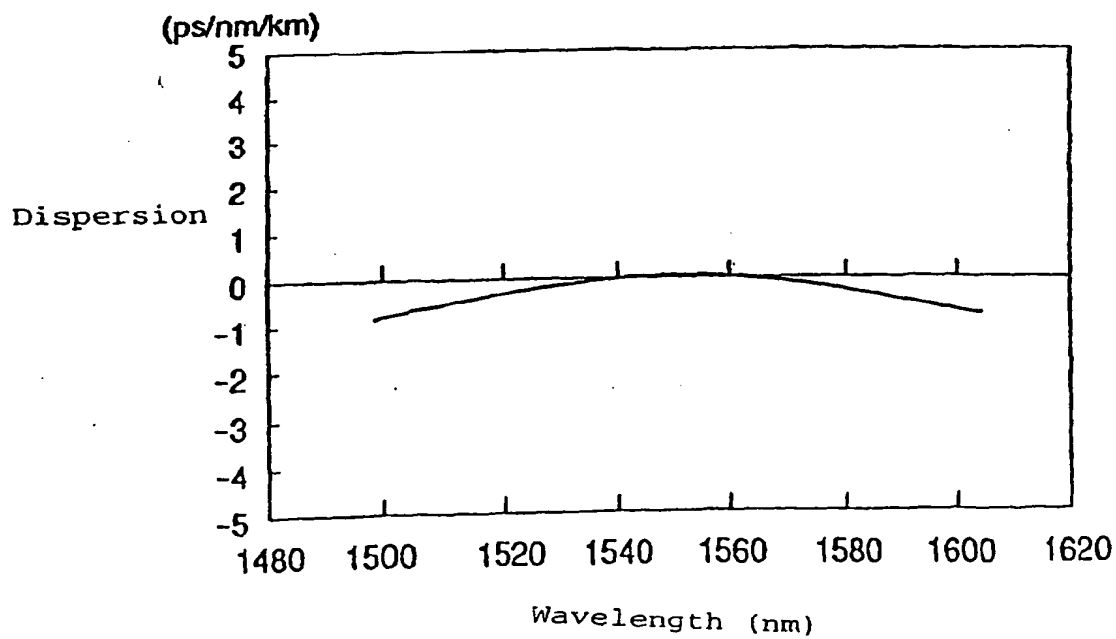
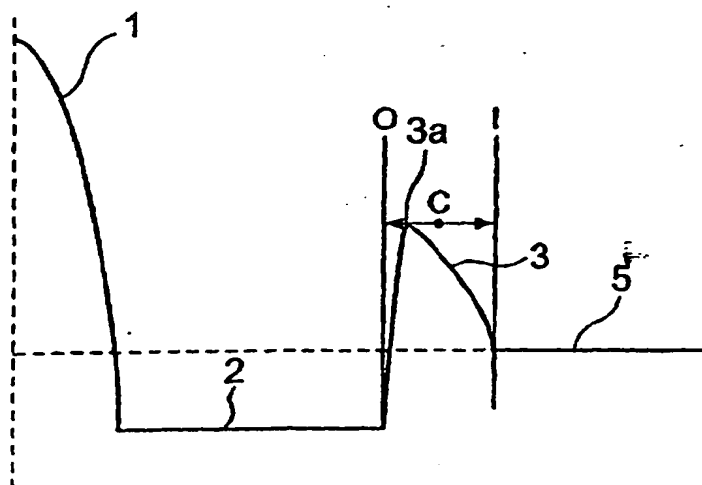


Fig. 5

(a)



(b)

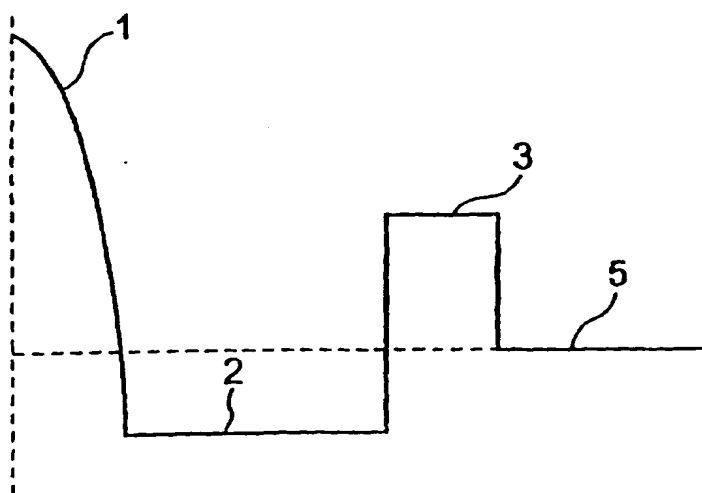


Fig. 6

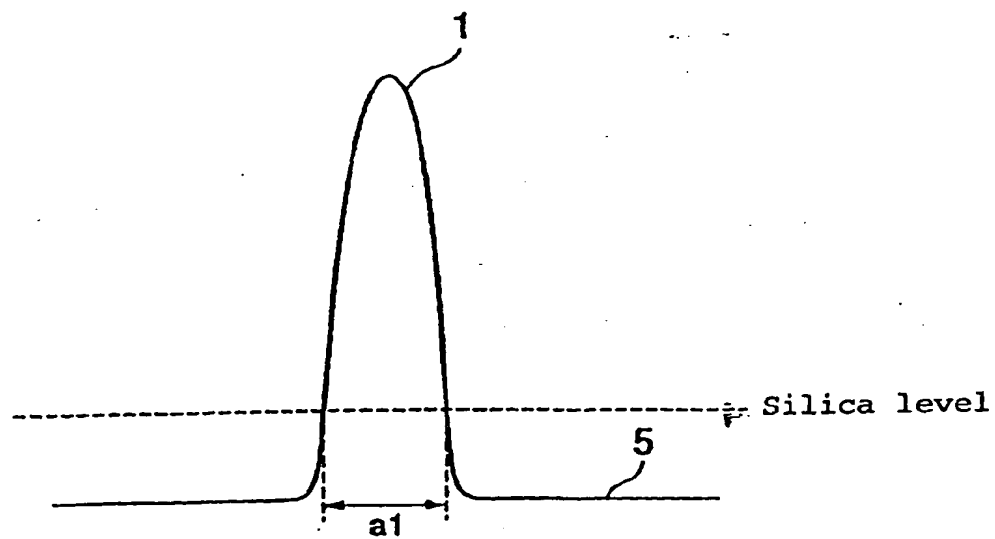
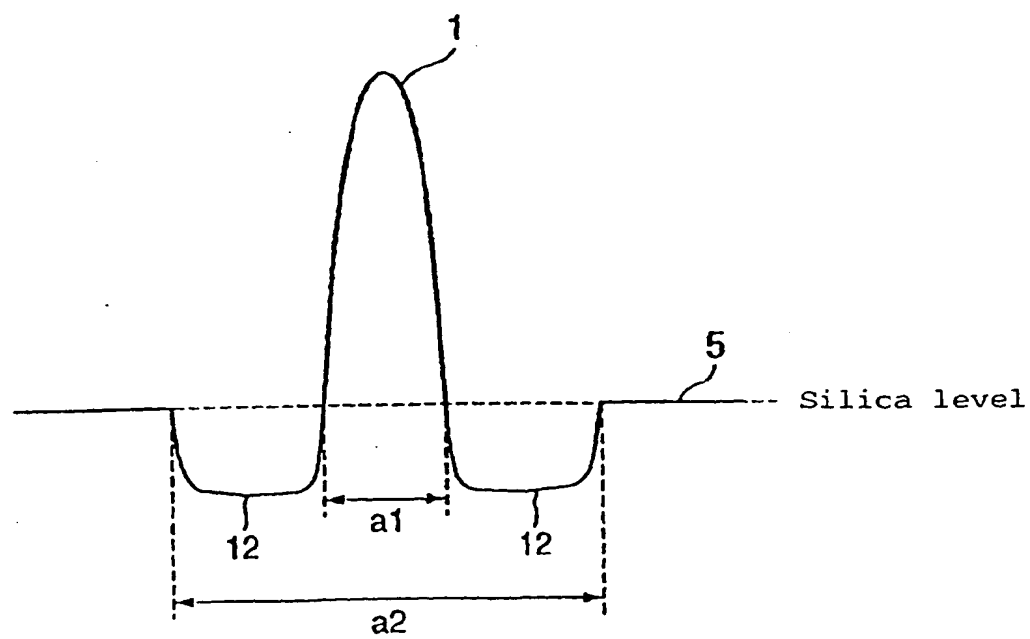


Fig. 7



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/03148

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int.Cl. <sup>7</sup> G02B 6/22, 6/16		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) Int.Cl. <sup>7</sup> G02B 6/22, 6/16		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2000 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2000 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2000		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO, 98/04941, A1 (CORNING INC.), 05 February, 1998 (05.02.98), Table 1,2; Figs. 1-3; especially, see Index 6 in Table 1 and Index 22-23 in Table 2	1-2, 5-6, 9-12, 15-18
Y	Claim 4-6; Table 1; Figs. 1,3 & JP, 11-507445, A & EP, 857313, A1	3-4, 7-8, 13-14
X	EP, 598554, A1 (AMERICAN TELEPHONE AND TELEGRAPH COMPANY), 25 May, 1994 (25.05.94), Figs. 1-5 & JP, 6-222235, A	1, 5, 9-11, 15-18 3, 7, 13
X	US, 5448674, A (VENGSARKAR ANISH M.), 05 September, 1995 (05.09.95) & JP, 7-270636, A & EP, 668520, A2	1, 5, 9-11, 15-18 3, 7, 13
X	JP, 10-319266, (Fujikura Ltd.), 04 December, 1998 (04.12.98), Par. No. 30; Tables 1; Figs. 1,2 (Family: none)	1, 5, 9-11, 15-18 3, 7, 13
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search 14 August, 2000 (14.08.00)		Date of mailing of the international search report 29 August, 2000 (29.08.00)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP00/03148

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	VENGASARKAR A. M. ET AL.: Dispersion-compensating single-mode fibers: efficient designs for first- and seconde-order compensation; OPTICS LETTERS, 01 JUNE 1993, VOL.18, NO.11, pp.924-926	1,5,9-11,15-18 3,7,13
X Y	SEMENOV V. A. ET AL.: Broadband dispersion-compensating firber for high-bit-rate transmission network use; APPLIED OPTICS, 20 August 1995, Vol.34, No.24, pp.5331-5337	1,5,9-11,15-18 3,7,13
Y	US, 4715679, A (BHAGAVATULA VENKATA A.), 29 December, 1987 (29.12.87) & JP, 58-104040, A & JP, 59-226301, A & EP, 127408, A	3-4,7-8, 13-14
A	US, 5361319, A (ANTOS A. JOSEPH), 01 November, 1994 (01.11.94), figs. 8,8a & JP, 6-11620, A & EP, 554714, A	1-18
A	US, 5838867, A (ONISHI MASASHI), 17 November, 1998 (17.11.98), Figs. 5-9, Fig. 11 & JP, 10-39155, A	1-18
P,Y	WO, 00/17684, A1 (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 30 March, 2000 (30.03.00) (Family: none)	1-18

Form PCT/ISA/210 (continuation of second sheet) (July 1992)